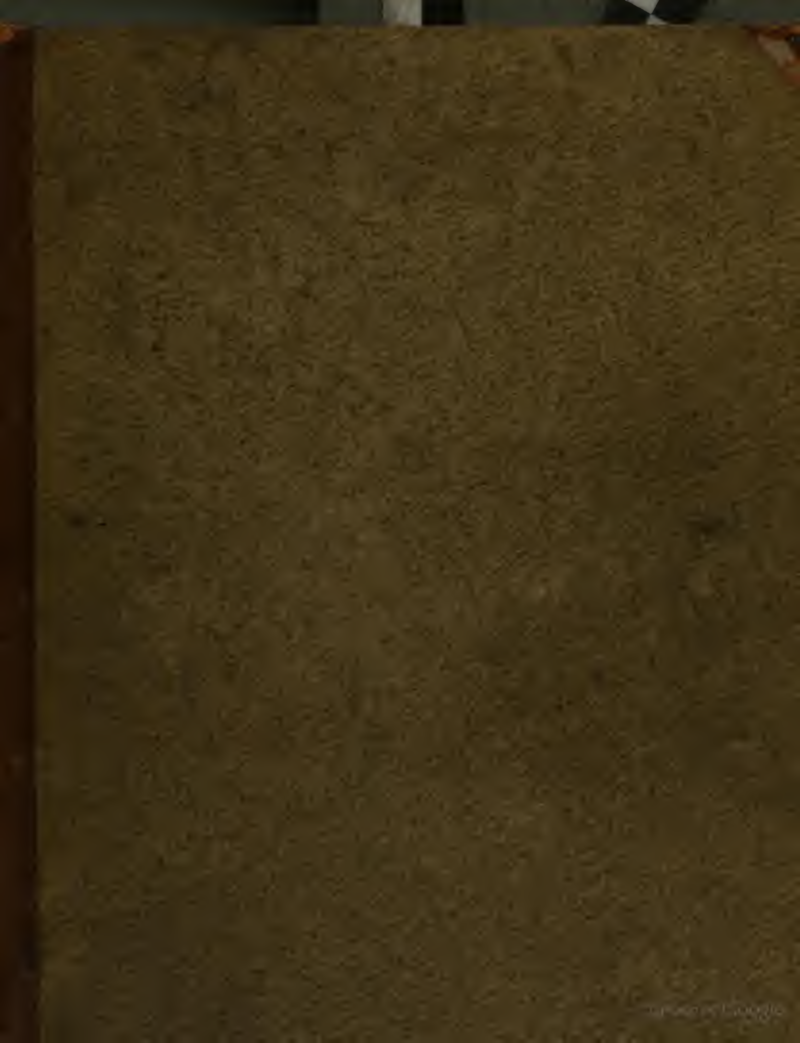
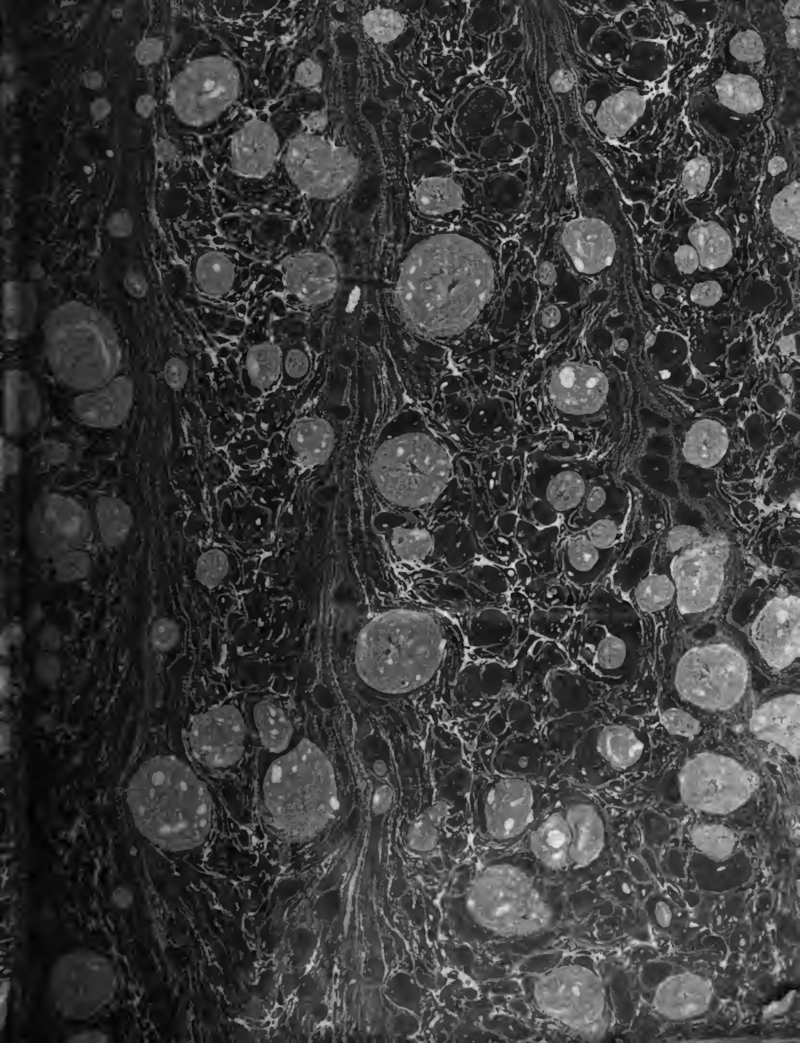




UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK GENT
900000070410



TRAITÉ

DE

MÉCANIQUE INDUSTRIELLE.

II.

IMPRIMERIE DE FAIN, PLACE DE L'ODÉON.

TRAITÉ

DE

MÉCANIQUE INDUSTRIELLE,

OU

EXPOSÉ DE LA SCIENCE DE LA MÉCANIQUE DÉDUITE DE L'EXPÉRIENCE ET DE L'OBSERVATION;

PRINCIPALEMENT

A L'USAGE DES MANUFACTURIERS ET DES ARTISTES;

PAR M. CHRISTIAN,

DIRECTEUR DU CONSERVATOIRE ROYAL DES ARTS ET MÉTIERS A PARIS.

TOME II.

PARIS,

BACHELIER, LIBRAIRE, SUCCESSEUR DE Mme. Ve. COURCIER,

QUAI DES AUGUSTINS.

1823.

SECONDE

LISTE DES SOUSCRIPTEURS.

A.

MM.

Anselin et Pochard, libraires à Paris, 6 exemplaires.

André (Aimé), libraire à Paris, 13 exemplaires.

Andryane, à Paris.

Allo, libraire à Amiens.

André, marchand de fer à Paris.

Allard, à Paris.

Aillaud, libraire à Paris, 2 exempl.

Artaria et Fontaine, libraires à Manheim, 4 exemplaires.

Arriaga (Sim. Joach.), à Paris.

B.

Busche, à Paris.

Bocca, libraire à Turin, 7 exempl.

Bocca (Joseph), libraire à Milan, 2 ex.

Bohaire, libraire à Lyon, 12 exempl.

Bernoulli (Chr.), professeur à Basle.

Bleuet, libraire à Paris.

Beaujeux (de), au château de Viantais (Orne).

Bibliothèque de l'Université, à Gand.

Breguet, membre de l'Institut à Paris.

Bargeas, libraire à Limoges.

Benard, à Arras.

Bonfils, professeur de mathématiques à la Flèche.

MM.

Bechu, à Pierre-Brou.

Bertrand (Arthus), libraire à Paris

Bresson père, prof. de math. à Paris.

Bintot, libraire à Besançon.

Bossange frères, libraires à Paris.

Bertin, à Paris.

Bonnefoy (Louis), à Lyon.

Boucher (Pierre), à Givet.

Bouchon, ingénieur à La-Ferté-Sous-Jouarre.

Bastien-Carré, à Paris.

Bettancourt (de), à Saint-Pétersbourg.

Bossange père, libraire à Paris.

Barrois aîné, libraire à Paris.

C.

Cumenge fils, à Castres.

Carillian Goeury, libraire à Paris, 23 exemplaires.

Cavret (madame veuve), libraire à Vienne (Isère).

Castel-Cicala (le prince de).

Conty, à La Haie-Descartes.

Collardin, libraire à Liége. 2 ex.

Cornetz (Frédérik) à Paris, 2 exempl.

Caron, ingénieur en chef des ponts et chaussées à Lyon.

Courcier, à Paris.

Clercy (Jules de), à Rouen.

MM.

Crosilhes, libraire à Villeneuve-sur-Lot.

D.

Dassy (Réné), à Meaux.
Denné, libraire à Madrid. 4 ex.
Delaunay, libraire à Paris.
Devilleneuve (le baron), à Paris.
Dulau et compagnie, libraires à Londres.
Davelouis, à Paris.
Dujardin, libraire à Gand.
Devilly, libraire à Metz.
Debure frères, libraires à Paris.
Demazis (Henri), à Paris.
Duplain, à Paris.
Didot (Firmin), libraire à Paris.
Deis, libraire à Besançon.
Demat, libraire à Bruxelles.
Dutarte, à Paris.
Desoer, libraire à Liége, 13 exempl.
Desrousseaux, à Paris.
Dan de Lavauterie, ingénieur en chef des ponts et chaussées à Saint-Lô.
Dassezat, à Toulouse.
Dablin, à Paris.
Delaroque jeune, libraire à Paris.
Drapiez, ingénieur à Rouen.

E.

Egasse, libraire à Brest.

F.

Frère, libraire à Rouen, 3 exempl.
Fourrier-Mame, libraire à Angers.
Ferry-Millon, à Saint-Diey.
Février, libraire à Strasbourg, 3 ex.

G.

Georges, à Paris.
Godard, à Verdun.

MM.

Grandbesançon, à Paris.
Gaderat-Capèle, à Carcassonne.
Gast, maître de forges à Audincourt.
Goulet (madame), libraire à Paris, 2 exemplaires.
Guillot, à Paris.
Gressier (Joseph), à Paris.
Gabon, libraire à Paris, 2 exempl.
Gluksberg, libraire à Varsovie, 4 ex.
Goupil, sous-directeur de la manuf. d'armes, à Châtellerault.
Gros (Philippe), à Paris.

H.

Hérran, à Paris.
Humbert (Bénédict), à Wysserling.
Huzard (madame), libraire à Paris, 3 exemplaires.
Hubert Lafamille, à Bernay.
Heuten, à Moscou.
Heathcoat, à Paris.
Hurtrel-Haudouart.
Hausen, aux Forges de Hambourg.

J.

Jaud, charpentier-mécanicien à Marly.
Jacob, à Paris.

K.

Koechlin (Joseph), à Mulhausen.
Komoroswki.

L.

Levrault (madame veuve), libraire à Strasbourg, 16 exemplaires.
Lafont-Ladebat, fils à Paris.
Leroux, libraire à Mons, 15 exempl.
Liller, à Paris.
Lagier (Victor), libraire à Dijon, 3 exemplaires.

MM.
Lieutaud, à Paris.
Lefèvre Bézier, à Paris.
Laiment, à Paris.
Lavoisier, à Paris.
Leleux, libraire à Calais, 2 exemplaires.
Lecharlier, libraire à Bruxelles.
Lecointe et Durey, libraire à Paris.
Lhéritier, au Mans.
Lequien, libraire à Paris.
Lyonnet, à Paris.
Ledoyen, libraire à Paris.
Lamarche, à Liége.
Laguerre, libraire à Bar-le-Duc.
Lawale jeune et neveu, libraires à Bordeaux, 3 exemplaires.

M.

Mertian, à Paris.
Missiaglia, à Venise.
Mongie aîné, libraire à Paris, 13 ex.
Mignard-Billinge, à Belleville.
Mallet, ingénieur à Paris.
Maswert, libraire à Marseille.
Ministère de la marine, 9 exempl.
Mellier fils aîné, à Roye.
Mellier (Achille), à Paris.
Montguyon (le comte), à Paris.
Motte, libraire à Saint-Etienne, 3 exempl.
Montmolin (de), à Paris.
Montaignac (de), à Rugles.
Molliex, libraire à Rennes.
Masson fils, libraire à Paris.
Maitre-Humbert, à Buffon.
Montgolfier, à Annonay.
Maillard (Alphonse), à Avranches.
Maire (Paul), à Dinan.

N.

Nazerct, ingénieur des ponts et chaussées, à Montbrison.

MM.
Neuflise (le baron de), à Paris.

O.

Odobel, à Paris.

P.

Paschoud, libraire à Genève, 2 exem.
Pallet de Surmond, à Turcing.
Poupard (Abraham), à Sedan.
Piatti, libraire à Florence, 4 exemp.
Place (Philippe), à Corbeil.
Painparé, libraire à Paris. 3 exemp.
Pélicier, libraire à Paris.
Pihet, ingénieur en chef des ponts et chaussées.
Pannetier, libraire à Colmar.
Perrève (le chevalier), à Paris.
Paul, à Paris.
Prudhomme et Leloutre, à Paris.
Paul (de) Stanislas.

R.

Rambourg fils, maître de forges à Tronçais.
Richard-Chambovet, à Saint-Chamond.
Robin, libraire à Niort.
Richaud (J.-J.), à Marseille.
Roze, à Paris.
Rittzen et Steel, ingénieurs à Paris.
Renard, libraire à Paris.
Risler-Heilmann, à Paris, 13 exemp.
Renouard, libraire à Paris.
Rapilly, à Paris.
Raffeneau, ingénieur à Arras.
Ridan, libraire à Paris.
Rambourg, à Paris.
Renault, libraire à Paris.

S.

Schlumberger (Nicolas), fabricant à Guebwillier.

MM.

Saladin, à Mulhouse.
Seguin, à Avignon.
Saint-Bris (de), à Paris.
Servier, libraire à Paris.
Seillière, à Paris.
Serres (le chevalier de), à Simpheropol.
Sauvage (l'abbé), à Lyon.
Saintin, libraire à Paris.
Sainte-Croix (de) directeur de la monnaie, à Perpignan.
Sebille-Auger, ingénieur à Bouxvillier.
Saxer (de), à Louvier.

T.

Terneaux et Fils, à Paris.
Thuillier, libraire à Hesdin.

MM.

Thirel, à Paris.
Thiel, libraire à Metz, 2 exemplaires.
Tourongin, à Paris.
Tarlier, libraire à Bruxelles.

V.

Wendel (de), à Metz.
Wanaker, libraire à Lille.
Vandekerkhove, libraire à Gand.
Vasseur, à Lille.
Vivaux, à Dammarie.
Weyher, libraire à Saint-Pétersbourg, 7 exemplaires.
Verdière, libraire à Paris.

Z.

Zubiaga, à Paris.

Nota. Il sera publié une *troisième liste* à la suite du troisième volume.

TABLE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS CE VOLUME.

SUITE DU LIVRE PREMIER.

LIVRE SECOND.

DES MÉCANISMES AYANT POUR OBJET DE TRANSMETTRE, DE TRANSFORMER ET DE MODIFIER LE MOUVEMENT MOTEUR.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

TRAITÉ
DE
MÉCANIQUE INDUSTRIELLE,
OU
EXPOSÉ DE LA SCIENCE DE LA MÉCANIQUE DÉDUITE DE L'EXPÉRIENCE ET DE L'OBSERVATION;

PRINCIPALEMENT

A L'USAGE DES MANUFACTURIERS ET DES ARTISTES.

> Les arts prirent naissance et l'heureuse industrie
> Vint cultiver la terre et défricher la vie.
>
> J. Delille.

SUITE DU LIVRE PREMIER.

CHAPITRE XXIX.

De l'action mécanique de l'air.

L'air atmosphérique, considéré comme moteur, présente, ainsi que l'eau, deux manières d'agir qu'il convient de distinguer; on le voit produire des effets mécaniques aussi-bien par simple pression, que par impulsion.

Il est vrai de dire que, dans le premier cas, il ne produit des effets de ce genre, que lorsque, par l'action d'une force étran-

gère, on met en exercice celle dont il devient capable; car, sans cette coopération, la pression de l'air par elle-même ne peut offrir à l'industrie aucun moyen applicable d'engendrer le mouvement.

Mais lorsqu'il se meut à la surface de la terre, par quelques causes dont nous aurons bientôt occasion de parler, il devient lui-même un moteur puissant, qui ne peut plus agir que par impulsion.

Dans l'usage que la mécanique pourrait faire de l'action de l'air par *pression*, on conçoit aisément, d'après ce que nous venons de dire, que l'homme est entièrement le maître d'en créer, pour ainsi dire, et d'en régler la puissance, puisqu'il doit la mettre en jeu par divers artifices qui sont de tous points sous sa dépendance.

Il s'en faut de beaucoup qu'il en soit de même dans le service de l'air agissant par impulsion. Il est de tous les moteurs le plus capricieux et le plus variable; il est le plus difficile à maîtriser et à régler; il n'est constant, ni dans sa puissance, ni dans sa direction; tantôt rien ne résiste à sa violence, et tantôt il n'est pas en état d'imprimer le moindre mouvement à ce qu'on a soumis à son action.

C'est quelquefois inopinément que sa force change de direction pour en prendre une opposée, ou bien qu'elle s'accroît outre mesure, ou qu'elle diminue de même. Il a fallu donc, pour tirer parti de ce moteur, faire des dispositions qui pussent se prêter à tant de changemens, à de si fréquentes variations. Aussi ne s'en sert-on communément que pour certaines opérations mécaniques, et encore lorsqu'on manque de cours d'eau qui le remplaceraient toujours avec avantage.

Quoi qu'il en soit, ce n'est pas de la pression, mais de l'action impulsive de l'air que l'industrie tire le plus de service; cepen-

dant, avant d'entrer en matière sur ce point, nous allons consacrer ce chapitre à l'examen des qualités mécaniques de ce fluide, et des effets de son action par simple pression ; c'est une étude qui nous sera utile, lorsque nous traiterons du moteur suivant.

L'air est un fluide pesant, compressible, élastique, et susceptible de dilatation par la chaleur. On ne peut parvenir, par aucun moyen connu, à lui faire perdre ce caractère de fluide invisible qui lui appartient avec quelques autres corps de la nature.

Il enveloppe le globe terrestre, qu'il presse sur tous les points, avec la force que lui donnent et sa densité et l'épaisseur, ou si l'on veut la hauteur de la couche qui repose sur la surface de la terre.

Cette pression est l'effet de la pesanteur qui s'exerce sur l'air, comme sur les corps solides ou liquides, et il résulte de cette pression, que ce fluide occupe naturellement sur le globe tous les espaces que d'autres corps n'occupent point, et que le *vide naturel* ne peut pas y exister. Ainsi, par exemple, aussitôt qu'on laisse écouler l'eau d'un vase, quelles qu'en soient les formes et les dimensions, l'air vient incontinent en prendre la place.

D'après les mesures les plus exactes, le poids d'un décimètre cube d'air sec, à la température de la glace fondante, et sous une pression de $0^{m},76$, est de $1^{g},299541$, et le centimètre cube de $0^{g},001299541$.

Quant à sa pesanteur spécifique, on a reconnu, par des déterminations rigoureuses, qu'à la température de $3^{\circ},42$, et sous la pression $0^{m},76$ (voyez *Eclaircissemens et Développemens*, article Ier.), le poids de l'air atmosphérique sec est, à volume égal, $\frac{1}{779,33}$ de celui de l'eau distillée.

Ainsi un *pied cube* d'eau, dans les circonstances ci-dessus, circonstances dont nous ferons voir l'influence dans ce chapitre, est environ 780 fois plus pesant qu'un pied cube d'air.

Si donc vous imaginiez deux colonnes isolées de même base, l'une d'air et l'autre d'eau, et que vous voulussiez les tenir en équilibre, en opposant leurs pressions respectives, il faudrait évidemment que la colonne d'air eût environ 780 fois plus de hauteur que la colonne d'eau, en admettant l'hypothèse que cette colonne d'air ait, sur tous les points de sa hauteur, la même densité que celle qui a servi à la mesure rapportée ci-dessus.

Nous allons voir en réalité les résultats de l'opposition de deux colonnes de cette espèce, et le fait de la pression mécanique de l'air, comme corps pesant, mis en évidence.

Toutes les colonnes de ce fluide qui correspondent à des petites portions contiguës de la surface de la terre, sont, dans un temps calme, en équilibre les unes avec les autres. Ainsi, par exemple, prenez un tuyau recourbé, ouvert par les deux bouts; et d'un même diamètre intérieur partout, versez-y, en mettant les orifices en haut, une certaine quantité d'eau; ce liquide s'élèvera à la même hauteur dans les deux branches de votre tuyau; d'abord, parce qu'il faut qu'il y ait autant d'eau dans une branche que dans l'autre, pour que les deux colonnes soient en équilibre, et ensuite, parce que deux colonnes d'air atmosphérique, correspondantes aux deux orifices du tuyau, reposeront et presseront également sur les deux colonnes d'eau.

Mais supprimons, par la pensée, l'action d'une de ces colonnes d'air atmosphérique sur l'un des orifices de notre tuyau recourbé; il est clair que l'autre colonne, venant à presser seule sur l'eau par l'autre orifice, cherchera à se mettre en équilibre avec ce liquide, et l'élèvera, dans l'autre branche du tuyau, à

une hauteur qui doit être dans le rapport des densités de ces deux fluides, et proportionnelle à la hauteur de l'atmosphère.

Nous pouvons, sans recourir à des suppositions, établir la réalité de la pression de l'air, en citant des faits journaliers. Le liquide dont un tonneau est rempli ne coulera pas, ou coulera bien peu par le robinet ou la cannelle, si l'on n'ôte point la bonde, ou si, vers ce point, on ne ménage pas une ouverture quelconque.

Lorsque la cannelle seule est ouverte, la colonne d'air atmosphérique, correspondant à cette ouverture, exerce une pression supérieure aux efforts de la pesanteur auxquels le liquide est soumis, et l'écoulement n'a point lieu. Mais aussitôt que la bonde est enlevée, ou seulement soulevée, une seconde colonne d'air vient agir à son tour, contrebalance l'action de la première, et le liquide coule, abandonné à la force seule de la pesanteur.

Que l'on renverse, par la bonde, dans un tonneau bien rempli de vin léger, une bouteille pleine d'eau : l'eau, à raison de sa plus grande densité, se précipitera au fond du tonneau, et le vin, par la pression de l'air, s'élevera dans la bouteille et la remplira.

Or, cette bouteille représente ici l'effet de la suppression de l'action d'une colonne atmosphérique sur l'une des branches du tuyau dont nous venons de parler, et il n'y a plus qu'une colonne d'air qui presse sur le vin du tonneau, car le vide tend à s'établir dans la bouteille, à mesure que l'eau en sort.

Par les mêmes raisons, un vase dont le fond serait criblé de trous, et qui serait construit de manière que l'orifice supérieur pût être parfaitement bouché, laisserait à peine échapper l'eau dont il serait rempli. Une bouteille pleine, bien bouchée et fêlée ne fuit point; mais elle fuit aussitôt qu'elle est débouchée.

L'air, ainsi que l'eau, presse donc en tous sens, et la valeur de

sa pression est équivalente au poids d'un prisme de ce fluide, dont la base est égale à la surface pressée, et dont la hauteur est la hauteur même de l'atmosphère.

Mais quelle est cette hauteur? Quand il s'agit de l'eau, la mesure directe donne la réponse; quand il s'agit de la hauteur de l'atmosphère, il faut chercher un équivalent par une expérience que voici.

Prenez un tuyau de verre de 8 à 10 décimètres de longueur; fermez-le hermétiquement à l'une de ses extrémités, et par l'autre remplissez-le entièrement de mercure; appliquez fortement le doigt sur cet orifice, et renversez le tuyau dans une cuvette contenant aussi un peu de mercure; retirez le doigt, lorsque l'orifice sera plongé dans le mercure de la cuvette. Aussitôt une portion du mercure sortira du tuyau et se mêlera à celui de la cuvette, et il n'en restera dans le tuyau qu'environ 7 décimètres et demi, ou $0^m,76$; or, cette colonne ne reste élevée, dans le tube, à 76 centimètres, que parce qu'elle est soutenue par la pression de l'air atmosphérique qui lui fait équilibre; cette pression est donc équivalente à une colonne de mercure, ayant pour base la surface pressée et pour hauteur $0^m,76$.

Si l'on employait de l'eau au lieu de mercure, avec un tuyau suffisamment grand, et en se servant du même procédé, la colonne d'eau qui resterait élevée dans le tuyau serait d'environ $10^m,390$ (32 *pieds*). Or, le rapport de ces hauteurs si différentes est précisément celui qui existe entre les densités de l'eau et du mercure; car une colonne de mercure d'environ 0,76 de hauteur et d'un centimètre carré de base, par exemple, a le même poids à peu près, qu'une colonne d'eau de même base et de 10,390 de hauteur.

Que si l'on substituait à l'eau et au mercure d'autres liquides, les colonnes respectives de ces liquides qui se mettraient

en équilibre avec l'action de l'atmosphère, seraient, pour les hauteurs, dans le rapport de leurs densités respectives.

Cette expérience qui sert à mesurer la valeur de la pression de l'air sur une surface donnée, peut servir aussi à faire reconnaître, par l'élévation ou l'abaissement de la colonne de mercure, les variations que subit l'atmosphère dans sa force de pression. C'est sur les faits offerts par cette expérience qu'est fondée la construction des *baromètres*, quelles que soient la forme et les dispositions qu'on leur donne.

Puisqu'une colonne d'air dans toute la hauteur de la couche qui enveloppe le globe de la terre est en équilibre avec une colonne de mercure de 28 *pouces* environ de hauteur, on pourrait croire qu'il serait aisé de déterminer la hauteur absolue de cette couche en calculant comme suit : l'air pèse environ onze mille fois moins que le mercure ; donc on a pour la colonne d'air en équilibre avec une colonne de mercure de 28 *pouces*, onze mille fois ce nombre ou 25667 *pieds ;* ce qui fait à peu près *deux lieues*. Mais la densité de l'air n'est pas la même à toutes les distances de la terre : elle va en diminuant de bas en haut ; parce que l'air étant compressible, les couches inférieures qui portent toute la charge de l'atmosphère sont plus denses que les supérieures. L'air est donc moins dense au sommet qu'au pied d'une haute montagne ; et si l'on remplit d'air une vessie au sommet de cette montagne de manière qu'elle soit parfaitement tendue, elle s'affaissera à mesure qu'on descendra ; ce qui prouve que l'air se comprime de plus en plus.

Il suit de là que si l'on concevait une colonne atmosphérique divisée en tranches horizontales d'un égal poids, ces tranches seraient nécessairement d'une épaisseur très-inégale, suivant la densité du fluide correspondante au point de la hauteur où

la tranche serait située; que si l'on divisait cette colonne en tranches d'égale épaisseur, les poids de ces diverses tranches seraient de même inégaux, et dans le rapport de leurs densités relatives.

Si l'on voulait essayer de déterminer la hauteur absolue de l'atmosphère, en ayant égard aux différentes densités des tranches horizontales que nous venons de supposer, il faudrait considérer une colonne atmosphérique comme composée de tranches d'un poids égal et capables, par exemple, de soutenir chacune une *ligne* de mercure. Les densités de ces tranches diminuant à proportion de leur élévation, leur épaisseur ira évidemment en augmentant de bas en haut; il s'agirait donc de trouver l'épaisseur de chaque tranche.

Pour cela on considérerait les 28 *pouces* de mercure comme convertis en *lignes*, ce qui en donne 336. La colonne d'air serait donc partagée en 336 tranches d'égal poids.

Deluc a trouvé que la première tranche était de 75 *pieds*, c'est-à-dire qu'en montant du point où le mercure est à 336 *lignes* à celui où il n'est plus qu'à 335 *lignes*, on s'est élevé verticalement à 75 *pieds*. Mais cette tranche est chargée du poids des 335 autres qui sont au-dessus et dont chacune a une pression équivalente à une *ligne* de mercure; si donc on voulait déterminer l'épaisseur de la seconde tranche soutenant le poids des 334 tranches supérieures, il faudrait dire 334 : 335 : : 75 est à un quatrième nombre qui montrerait que la seconde tranche aurait environ 32 *lignes* d'épaisseur de plus que la première; on opérerait de même pour toutes les autres tranches.

Deluc, en calculant d'après ce principe, a trouvé qu'à une hauteur de 11 *lieues*, l'air ne peut plus soutenir qu'une *ligne* de mercure, et à 17 lieues qu'un dixième de *ligne*. Mais on ne sait

pas quelle peut être la limite de la hauteur totale de l'atmosphère.

Nous venons d'établir d'une manière évidente la pression de l'atmosphère et la valeur de cette pression, qui varie, à la vérité, même en un lieu donné, mais dans des limites assez rapprochées; c'est pourquoi dans les recherches sur cette pression, l'exactitude exige qu'on détermine à quelle hauteur de mercure répond la pression au moment de l'expérience.

On conçoit maintenant pourquoi l'on éprouve une résistance plus ou moins grande à soulever le piston d'une seringue, ou d'un corps de pompe, dont un des orifices serait parfaitement bouché; car pour cela il faut soulever une colonne entière d'air atmosphérique dont la base est égale à la surface du piston, et il serait facile de déterminer quelle devrait être la surface du piston, pour résister invinciblement aux efforts d'un homme qui essayerait de le soulever.

On s'explique aisément aussi pourquoi nous avons dit au commencement de ce chapitre, qu'on ne peut produire de mouvement en faisant agir l'air par pression, que par la coopération d'une force étrangère qui donne lieu à la production d'un effet mécanique, en anéantissant l'action d'une colonne atmosphérique, ou, pour parler autrement, *en faisant le vide*.

On fait le vide de deux manières: 1°. en remplissant un long tube de liquide et en le renversant comme nous l'avons dit plus haut; si le liquide est du mercure, le vide est fait, au-dessus de 0^m, 76 environ, dans tout l'espace qui sépare ce point du sommet de ce tube, lequel, comme on le sait, est fermé hermétiquement; si c'est de l'eau, il a lieu au-dessus d'une colonne de 10^m, 390 environ; 2°. en chassant l'air d'une capacité quelconque, par un corps qui vient prendre sa place, sans qu'il puisse la reprendre; c'est ce qu'on fait avec de la vapeur d'eau qu'on détruit

subitement, comme nous le verrons en son lieu; ou bien avec un piston qu'on soulève dans un corps de pompe, pour puiser l'air renfermé dans un vase bien fermé, partout ailleurs qu'à l'orifice qu'on met en communication avec ce corps de pompe, qu'on appelle vulgairement *pompe pneumatique*. Nous verrons bientôt que le vide obtenu par une pompe n'est pas parfait, lorsque nous aurons examiné quelques autres qualités mécaniques de l'air.

Nous avons dit plus haut que l'air est compressible, c'est-à-dire qu'il se replie, en quelque sorte sur lui-même, lorsqu'une force suffisante le comprime.

Une expérience très-simple le prouve : prenez un verre à boire, plongez-le verticalement dans l'eau, l'ouverture en bas; l'eau s'élèvera dans le verre à une hauteur d'autant plus grande que vous l'aurez plongé à une plus grande profondeur; mais elle ne remplira jamais toute la capacité du verre, parce que l'air qui y était contenu avant, n'a pu s'échapper, d'après la manière dont le vase a été plongé dans l'eau. L'eau n'a donc pu s'y introduire, que parce que l'air s'est replié sur lui-même, que son volume a été diminué par l'action de l'eau, en un mot parce qu'il s'est laissé comprimer.

Vous pouvez produire ce fait d'une autre manière : prenez un tuyau de verre recourbé, et dont les deux branches soient à peu près parallèles; fermez hermétiquement ce tuyau par l'un des bouts, et par l'autre versez-y du mercure, vous verrez le mercure s'élever dans la branche fermée, bien qu'elle soit pleine d'air; mais comme cet air n'a aucune issue pour s'échapper, vous remarquerez que le mercure se tiendra plus bas dans cette branche que dans l'autre, à cause de la résistance que l'air lui opposera. Or puisque le mercure a pu y pénétrer, il est évident que l'air y a été comprimé.

Il s'agit maintenant de savoir dans quel rapport il se comprime, eu égard à la pression qui s'exerce sur lui.

Prenez encore un tuyau recourbé dont les deux branches soient d'inégales longueurs; la plus courte doit être d'un calibre bien égal sur toute sa hauteur, elle doit être aussi fermée très-exactement. On verse un peu de mercure par la grande branche pour remplir la courbure du tuyau, et séparer ainsi par le liquide, la colonne d'air, que contient la petite branche, de celle qui reste dans la grande. Mesurez la hauteur de la colonne d'air qui occupe la petite branche au-dessus du mercure; versez ensuite une nouvelle quantité de mercure dans la grande branche jusqu'à ce qu'il y en ait à la hauteur de 0^{m}, 76 au-dessus du niveau de la portion de mercure qui a pénétré dans la petite branche; vous remarquerez que la hauteur de la colonne d'air qui remplissait cette petite branche est diminuée de moitié, et ces 76 centimètres de mercure qu'on vient de verser sont l'équivalent du poids d'une colonne d'air atmosphérique; l'air renfermé dans la petite branche éprouve donc une pression double de celle qu'il éprouvait auparavant, savoir : la pression de l'air extérieur qui presse sur le mercure et la colonne du mercure elle-même qui exerce une pression égale; et son volume est précisément réduit à la moitié de ce qu'il était.

Si vous continuez d'ajouter du mercure par la grande branche, vous verrez le volume de l'air de la petite branche diminuer dans la même proportion que la pression exercée par le poids du mercure augmentera. Mais à mesure que son volume diminue, sa densité devient plus grande, parce que ses molécules se rapprochent; il est donc permis de conclure de cette expérience que *le volume de l'air est en raison inverse et sa densité en raison directe du poids dont il est chargé.*

Hales fit descendre à une grande profondeur dans la mer,

un ballon de cuivre rempli d'air et ouvert par le bas; il fit subir ainsi à ce fluide une pression équivalente à 32 fois le poids de l'atmosphère et l'air fut réduit à la 32ᵉ partie de son volume. Il alla plus loin; il lui fit subir une pression 1500 fois plus grande que le poids de l'atmosphère, c'est-à-dire une pression équivalente à celle d'une colonne de mercure d'environ 3500 *pieds* de hauteur, ou à une colonne d'eau d'à peu près 48000 pieds; mais il ne put savoir si le volume de l'air avait une diminution proportionnelle. Au reste, lorsqu'on a pu mesurer la réduction d'un volume d'air par la pression, on a remarqué qu'elle suivait la loi dont nous venons de parler dans le paragraphe précédent, et jamais on n'a pu parvenir à rendre l'air *visible* quelque densité qu'on lui ait donnée par la compression.

L'air réagit contre la force qui le comprime, parce qu'il est élastique, et il reprend son premier volume, lorsque cette force cesse d'agir : c'est comme un ressort tendu, qui se détend avec la force qui s'est exercée sur lui et jouit dans cet état de la faculté d'imprimer du mouvement à tout corps dont la résistance est inférieure à la puissance réagissante de l'air comprimé.

Parmi toutes les preuves expérimentales qu'on pourrait donner de la force élastique de l'air comprimé, nous citerons celle-ci : prenez un vase de métal dont l'ouverture soit assez étroite pour être fermée exactement par un tuyau; remplissez le vase à moitié d'eau; la moitié supérieure de ce vase sera, on le sent bien, occupée par l'air; fermez exactement l'ouverture du vase en y introduisant le tuyau dont vous faites plonger le bout jusques dans l'eau; bouchez, pour un instant, l'orifice supérieur de ce tuyau; faites entrer de nouvel air dans le vase, au moyen d'une petite pompe ajustée sur une tubulure, que nous supposons établie à la partie supérieure du vase; la quantité d'air

que vous introduirez, se comprimera avec celle qui se trouve au dessus de l'eau, dans le vase. Or si vous débouchez le tuyau, après quelques coups de piston, l'eau jaillira du vase par le tuyau, à une hauteur d'autant plus grande, que vous aurez donné plus de coups de piston, et que vous aurez plus comprimé l'air dans le vase, par les quantités de ce fluide que vous y aurez successivement fait entrer.

Cet effet est aisé à concevoir : tant que le tuyau reste bouché, le ressort de l'air qui agit sur la surface de l'eau, n'a d'autre effet que de la faire monter dans ce tuyau jusqu'à sa fermeture; mais aussitôt que le tuyau est ouvert, la réaction de l'air ne trouve plus d'obstacle à lancer l'eau du vase avec toute la force qu'il a reçue par la compression.

La construction des fusils à vent est fondée sur cette propriété de l'air; l'on sait que l'air, refoulé et comprimé dans la crosse de cette espèce de fusil, peut, en s'échappant, lancer une balle avec une force comparable à celle de la poudre à tirer.

Les couches horizontales de l'air atmosphérique sont dans un état permanent de compression, les inférieures étant chargées du poids des supérieures : mais l'air, par son élasticité, résiste à cette compression, et fait par conséquent effort pour s'étendre. En effet, aussitôt que l'on diminue la pression qu'il subit, il s'étend, son volume augmente, et l'on dit que l'air se *raréfie.*

Prenez un petit flacon, à moitié plein d'eau, ajustez à son goulot un petit tube qui plonge jusque dans l'eau, et fermez exactement l'ouverture du flacon, à peu près comme ci-dessus. L'air qui occupe la moitié supérieure du vase, est en équilibre avec la colonne d'air qui repose sur l'orifice du petit tube, et aucun effet n'est produit.

Mais si l'air est raréfiable, comme nous venons de le dire,

s'il fait continuellement effort pour s'étendre, il est évident que, si par un moyen quelconque nous venons à diminuer la pression de la colonne d'air extérieur qui agit sur l'orifice du tuyau, l'air renfermé dans le flacon doit agir à son tour sur l'eau et la faire monter dans le tube, comme cela est arrivé plus haut par la compression.

Placez donc ce flacon sous un récipient dont vous puissiez soutirer l'air par l'action d'une pompe : la pression sur l'orifice du tube diminuera à chaque coup de piston; l'air intérieur du flacon se raréfiera, pressera la surface de l'eau et finira par faire jaillir tout ce qu'en contient le flacon. L'action expansive de cet air ne peut cesser d'agir sur l'eau que, lorsqu'arrivé au même degré de raréfaction que celui du récipient, il se met en équilibre avec lui.

Quand on pompe l'air, comme nous venons de le dire, d'un récipient parfaitement clos, l'air qui reste après chaque coup de piston, se raréfie toujours davantage et continue à remplir toute la capacité du récipient : on conçoit dès lors l'impossibilité physique de faire sortir tout l'air que celui-ci contient; en un mot, de faire, par ce moyen, un vide parfait, puisqu'à chaque coup de piston, on n'enlève qu'une portion d'air, l'air restant, quoique plus rare, remplit toujours le récipient.

Quoi qu'il en soit, on arrive d'autant plus promptement à faire un certain degré de vide dans un récipient, que le corps de pompe a plus de diamètre, et le piston plus de course.

Lorsqu'on connaît la grandeur du récipient et l'espace parcouru par le piston à chaque coup, on peut évaluer facilement ce qui reste d'air dans le récipient après chaque coup. Ainsi, en supposant que le récipient et le corps de pompe soient d'une capacité égale, les quantités d'air soutirées à chaque coup, comme celles qui restent dans le récipient, formeront la progression

décroissante $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{32}$, etc.; d'où l'on peut conclure qu'il restera toujours une fraction d'air dans le récipient, quelle que soit la durée de l'action de la pompe.

Le volume de l'air qui se raréfie, augmente donc en raison de la diminution de la pression; on ne sait pas à quelles limites la raréfaction de ce fluide peut s'arrêter; on sait seulement qu'elle peut s'étendre fort loin et augmenter plus de trois cent fois un volume d'air donné.

Pour diminuer ou pour augmenter le volume d'une quantité d'air donnée, il n'est pas toujours nécessaire de diminuer ou d'augmenter la pression à laquelle il est soumis : l'air se dilate, se raréfie par la chaleur, et se contracte et semble se comprimer par un abaissement de température, par le froid.

Prenez un flacon de verre mince, comme ci-dessus, dans lequel vous aurez mis un peu d'eau colorée; fermez-en exactement le goulot par un tube ouvert aux extrémités, dont l'une plonge dans l'eau du flacon. En appliquant la chaleur de la main sur la partie supérieure du flacon, où se trouve l'air, vous remarquerez que le liquide s'élèvera dans le tube.

Si au lieu d'échauffer l'air du flacon, comme vous venez de le faire, vous le refroidissez, en l'entourant de glace, la petite colonne d'eau, élevée dans le tube, descendra incontinent.

Or, quand le liquide monte dans le tuyau, c'est que l'air du flacon s'est dilaté, puisqu'il exerce une pression nouvelle sur ce liquide; et lorsque le liquide descend, c'est que l'air se contracte, diminue de volume et presse moins l'eau du flacon, tandis que la colonne d'air extérieure, correspondant à l'orifice supérieur du tube tend à repousser dans ce flacon la liqueur que contient le tube. Cette expérience met dans tout son jour cette double propriété de l'air.

Mais lorsque ce fluide reçoit l'action de la chaleur, et qu'au-

cun obstacle ne l'empêche de se dilater, sa force élastique reste la même, bien que sa densité soit diminuée.

Si, au contraire, il ne peut s'étendre, par la présence de quelqu'obstacle, sa densité reste la même et sa force élastique augmente en proportion de la chaleur qu'il reçoit. Cette force peut augmenter au point de briser ou de renverser de très-grands obstacles qui lui seraient opposés.

On évalue qu'une masse d'air donnée à zéro du thermomètre, et en équilibre avec une colonne de mercure de 75 centimètres, par exemple, peut, lorsqu'elle est élevée à cent degrés du thermomètre centigrade, soutenir une colonne de mercure d'environ cent centimètres; ce qui prouve que, depuis la température de la glace fondante, jusqu'à celle de l'eau bouillante, la force élastique de l'air s'accroît à peu près d'un *tiers*.

Si la pression reste la même, pendant que l'air s'échauffe, il résulte des belles expériences de M. Gay-Lussac, que, depuis la température de la glace fondante, jusqu'à celle de cent degrés de thermomètre centésimal, l'étendue de la dilatation de ce fluide est égale à 0,375 de son volume primitif; c'est-à-dire du volume qu'il avait à 0 de température.

Tel est l'effet de la chaleur sur des portions d'air renfermé qu'on soumet à l'expérience; d'autres phénomènes se présentent, si nous considérons cette action sur l'atmosphère.

Lorsque les couches inférieures de l'air atmosphérique sont dilatées par l'action du soleil, ou dans quelques autres circonstances, elles deviennent plus légères que les couches supérieures; l'équilibre est rompu, et les couches échauffées s'élèvent comme plus légères, tandis que les autres descendent vers la terre. L'atmosphère se met ainsi en mouvement, et c'est alors qu'on tire parti de la force impulsive de l'air comme moteur, ainsi que nous allons le voir dans le chapitre suivant.

CHAPITRE XXX.

Suite du même sujet. De l'action du vent, comme force motrice.

Le mouvement de translation plus ou moins rapide que diverses portions de l'atmosphère subissent, et que l'on nomme *vent*, semble provenir principalement de l'échauffement ou du refroidissement de masses atmosphériques partielles.

L'air des régions refroidies se porte vers celles qui sont échauffées; de là ces immenses courans d'air, dont les uns sont constans et périodiques, comme sous la zone torride, et les autres variables, comme ceux qui ont lieu dans l'intérieur des terres, sur les continens.

La conformation de la surface des diverses contrées influe puissamment sur la direction des vents: les chaînes de montagnes, les forêts, les bassins des rivières, les collines mêmes qui coupent un pays sur différens points, rompent les courans atmosphériques, les détournent de la direction qu'ils prendraient dans la circonstance qui les a produits, et les renvoient dans toutes sortes de sens, aussi variables que les accidens et les obstacles qu'ils rencontrent sur leur passage.

C'est dans cet état de variation cependant que l'industrie doit en général prendre le vent pour le faire servir de moteur (il n'est pas de notre ressort de parler de l'usage du vent dans la navigation); il faut qu'elle accorde ses dispositions mécaniques à ces nombreux changemens, non-seulement de direction, mais encore de puissance d'action; car les causes qui rompent l'équilibre des colonnes atmosphériques et les mettent en mouve-

ment étant variables elles-mêmes, il est évident que les effets, c'est-à-dire la vitesse du mouvement de translation de l'air, d'où dépend la force motrice des vents, le sont aussi.

Les endroits où ce moteur se présente avec le plus d'avantage sont les plaines, les points culminans d'une contrée; quelquefois même dans certaines positions à l'entrée ou à la sortie d'une gorge de montagne. Là, les vents suivent leur mouvement naturel, sans rencontrer d'obstacles qui les brisent ou les détournent; ici, la disposition des lieux peut être telle qu'elle renvoie le vent de plusieurs points de l'horizon vers un autre qu'il faut choisir, pour y établir le service de ce moteur.

Quoi qu'il en soit, de tous les moteurs inanimés, le vent est, en général, le dernier auquel on doive avoir recours pour la plupart des opérations industrielles; aussi n'est-il ordinairement employé que dans les pays où les cours d'eau manquent, et où précisément le vent règne habituellement avec le plus de force, c'est-à-dire dans les pays de plaine. A défaut d'autres, il faut quelquefois se servir de celui-là.

On ne peut disconvenir cependant que ce moteur ne soit très-économique, sans l'être toutefois plus que l'eau, et qu'en outre il a sur celle-ci un avantage qui lui est tout-à-fait particulier: c'est de présenter naturellement du mouvement sur une grande étendue de surface, tant en longueur, qu'en largeur; et en effet, dans une plaine immense, le nombre de points, sur lesquels on peut prendre de la force motrice et former des établissemens, est très-considérable.

On ne pourrait pas, comme nous l'avons vu, en agir ainsi avec un cours d'eau. Mais l'eau, on la rassemble, on en dirige, on en ménage la force; on en obtient des effets assez réguliers; l'action du vent, il faut la prendre comme elle est et quand elle paraît, sans pouvoir influer ni sur sa force absolue, ni sur sa

direction, et le travail que fait ce moteur est aussi irrégulier qu'il l'est lui-même.

Toutes les opérations mécaniques qui exigent une puissance motrice constante, régulière; toutes celles qui se composent d'une suite de travaux dépendans les uns des autres, et auxquels beaucoup de main-d'œuvre est appliquée, ne peuvent donc être confiées à ce moteur. Il ne convient qu'à certaines opérations qui ne demandent le concours que de peu de bras, et dont le travail peut augmenter ou diminuer, ou même s'interrompre sans inconvénient; telles sont, par exemple, celles des moulins ordinaires à tan, à farine et à huile; des scieries communes, mais principalement les irrigations et les desséchemens.

Malgré les inconvéniens attachés à l'emploi du vent comme moteur, l'usage en est répandu partout, et depuis fort long-temps on s'accorde généralement à dire qu'il était connu en Orient avant les croisades; on prétend même qu'il l'était en France avant ce temps. Aujourd'hui on emploie ce moteur, comme il est permis de croire qu'on l'employait anciennement, c'est-à-dire à des opérations de la nature de celles dont nous venons de parler.

Ce moteur présente un fait curieux qui n'a point échappé à quelques-uns de ceux qui ont écrit sur ce sujet: c'est que la manière commune, celle qui est en général adoptée, de recevoir l'action de ce moteur pour la transmettre au travail, approche autant de la perfection qu'on pourrait se promettre d'en approcher par les recherches scientifiques les plus heureuses.

Les hommes qui ont le plus approfondi cette matière, et par des expériences directes, et par leurs observations sur l'usage ordinaire de la force motrice du vent, semblent s'accorder à dire qu'on ne doit pas espérer pouvoir y porter des innovations

avantageuses de quelque importance ; et nous pensons qu'il est beaucoup plus utile de chercher à perfectionner les détails de la construction du mode d'application généralement adopté, que d'entreprendre d'en changer le système et les formes principales. C'est peut-être un des sujets de recherches les plus stériles de toute la mécanique industrielle, non pas assurément en ce qui concerne la connaissance de ce qui est fait, mais relativement à la prétention que l'on pourrait avoir de faire beaucoup mieux que ce qu'on a fait jusqu'à présent.

Pour approfondir, autant qu'il nous est possible, ce que l'on connaît de ce moteur, nous examinerons, 1°. son action sur une surface en repos qui lui est directement opposée et la mesure de cette action ;

2°. La manière la plus avantageuse de la recevoir et de la transmettre au travail, ainsi que les effets mécaniques qu'on en obtient.

De l'action du vent contre des surfaces en repos, exposées perpendiculairement à cette action.

La puissance du vent est évidemment dépendante de la masse d'air agissante, et de la vitesse de cette masse.

Or nous avons vu plus haut qu'un décimètre cube d'air sec, à la température de la glace fondante, et sous une pression représentée par une colonne de mercure de 76 centimètres, pèse 1 gramme, 299541 ; ou si nous prenons les évaluations de Lavoisier, un *pied* cube d'air pèse 1 *once*, 3 *gros*, 3 grains, à 10 degrés Réaumur.

Quant à la vitesse, on peut la déterminer ainsi que Mariotte et Coulomb l'ont fait : on laisse entraîner par le vent des plumes très-légères ; deux hommes, placés sur une petite élévation dans la direction du vent et à une assez grande distance l'un de l'autre, observent le temps que ces plumes emploient à parcourir

l'espace qui sépare les deux observateurs. On trouve ainsi la vitesse, en divisant, comme on le sait, l'espace par le temps; par exemple, si l'espace est de 50 mètres, et que la plume employe 10 secondes à le parcourir, la vitesse sera de 5 mètres par seconde.

Il s'agit de savoir maintenant, si, connaissant la masse d'air agissante et sa vitesse, il est possible, sans expérience préalable, de déterminer la valeur absolue de la force de ce vent sur une surface donnée.

En appliquant au vent ce que nous avons fait pour l'action de l'eau, nous trouverions que la valeur absolue de l'impulsion du vent, dont la vitesse serait de 5 mètres par seconde, contre une surface perpendiculaire à sa direction et en repos, d'un mètre quarré, par exemple, serait équivalente à une colonne d'air d'un mètre de base et d'une hauteur égale à la hauteur *due* à la vitesse du vent, plus $\frac{15}{100}$ de cette hauteur.

Mais consultons l'expérience sur ce point, et voyons si elle nous donnera les mêmes valeurs.

Plusieurs habiles observateurs ont fait des recherches à ce sujet : nous citerons celles de Mariotte, de Borda et de Rouse cité lui-même par Smeaton. Les résultats qu'ils ont obtenus nous semblent mériter d'autant plus de confiance, qu'ils s'accordent autant entre eux que des expériences de ce genre peuvent le comporter.

Il y a trois manières de faire ces expériences : la première consiste à faire sortir une quantité donnée d'air renfermée dans un réservoir, qu'on dirige sur une surface; la seconde à faire mouvoir une surface avec une certaine vitesse dans de l'air tranquille; et la troisième enfin à exposer la surface au vent même, dont on détermine la vitesse, comme nous l'avons dit plus haut.

Borda s'est servi de la seconde manière; nous ne savons pas au juste comment les deux autres ont opéré.

Mariotte a trouvé que le vent, dont la vitesse est de 3 mètres 898 par seconde, exerce une impulsion de 179 grammes, contre une surface en repos de 104976 millimètres carrés.

Borda a trouvé les résultats portés dans le tableau suivant.

SURFACE DE 59049 millimètres carrés.		SURFACE DE 26244 millimètres carrés.		SURFACE DE 11664 millimètres carrés.	
Vitesse par seconde.	Valeur de l'impulsion.	Vitesse par seconde.	Valeur de l'impulsion.	Vitesse par seconde.	Valeur de l'impulsion.
Mètres.	Grammes.	Mètres.	Grammes.	Mètres.	Grammes.
3,462	75,727	5,418	75,825	8,293	12,055
2,461	35,881	3,843	37,888	5,843	36,027
1,728	18,894	2,722	18,944	4,112	18,013
1,218	9,447	1,930	9,447	2,910	9,006
		1,361	4,699	2,056	4,503

Voici les valeurs trouvées par Rouse, exprimées en mesures métriques.

VITESSE par seconde.	SURFACE de 929,006 centim. carrés, exposés perpendiculairement à l'action du vent.	NOMS vulgaires donnés à ces diverses forces de vent.
Mètres.	Grammes.	
0,448.	2,267	à peine sensible.
0,893.	9,068	brise légère.
1,341.	19,961	
1,789.	35,881	vent frais.
2,234.	55,773	
4,471.	223,091	vent bon frais.
6,705.	502,000	
8,942.	892,367	forte brise.
11,176.	1394,324	
13,412.	2008,281	vent impétueux.
15,648.	2732,876	
17,885.	3570,000	rafale.
20,117.	4517,612	
22,356.	5577,299	tempête.
26,824.	8032,671	grande tempête.
35,771.	14278,890	ouragan.
44,713.	22309,198	ouragan qui déracine les arbres, renverse les maisons, etc.

Smeaton pense au sujet de ce tableau que les expériences dans lesquelles la vitesse du vent est supérieure à 22 mètres par seconde, ne méritent pas la même confiance que celles où la vitesse du vent est au-dessous de ce nombre.

Si l'on prend les nombres donnés, d'après l'expérience, par l'un des trois auteurs que nous venons de citer, l'on verra que la règle applicable à l'impulsion directe et perpendiculaire de l'eau ne l'est point à celle du vent.

Voici ce que Borda dit à ce sujet (*Mémoires de l'Académie des Sciences, pour l'année* 1763, *page* 365) : nous trouvons

qu'une surface de 9 *pouces* en carré, mue avec une vitesse de 10 *pieds* 66 par seconde, éprouve une résistance égale à $0^{liv}.1547$; mais on la suppose ordinairement égale au poids d'une colonne d'air qui aurait pour base cette surface, et pour hauteur celle d'où un corps pesant devrait tomber pour acquérir la vitesse avec laquelle la surface se meut; or le poids de cette colonne (en supposant que le *pied* cube d'eau pèse 70 *livres* et que la pesanteur spécifique de l'eau et de l'air sont entre elles comme 800 est à 1) serait égal à $0^{liv}.0932$. Ainsi la résistance trouvée par la méthode ordinaire est à celle qu'on trouve par expérience, comme $0^{liv}.0932$ est à $0^{liv}.1547$, ou à peu près comme 3 est à 5. La règle ordinaire de la simple hauteur donne donc une résistance beaucoup plus petite qu'elle n'est réellement; à moins, dit Borda, qu'on ne veuille supposer que dans le temps de mes expériences, l'air était seulement 480 fois moins dense que l'eau.

Il est certain qu'on n'arriverait pas encore au résultat expérimental obtenu de l'impulsion de l'air, en ajoutant à la simple hauteur les $\frac{15}{100}$ que nous avons trouvé qu'il fallait ajouter d'après nos expériences sur l'eau, consignées dans le premier volume de cet ouvrage. Il faut donc conclure que le vent agit autrement que l'eau, et il semble que c'est à l'expérience seule qu'il appartient de marquer les différences que présentent les impulsions respectives de ces deux corps.

Au surplus, il n'est pas difficile de concevoir que l'impulsion de l'eau ne peut pas être la même, toutes proportions gardées, que celle de l'air : celui-ci est un corps très-élastique, et dans son choc il n'éprouve point, comme l'eau, une perte de mouvement; le changement de figure qu'il éprouve au moment de l'impulsion, ou, si l'on veut, le refoulement de ses molécules n'est autre chose que la compression instantanée d'un ressort.

qui a la faculté de restituer toute la force qui a servi à le comprimer. Cette différence dans l'action impulsive de ces deux corps est fondamentale, et nous semble expliquer pourquoi la règle à laquelle cette action est soumise pour l'eau ne s'applique point au choc du vent.

On voit par les nombres portés dans les deux tableaux précédens que l'action impulsive du vent, sous différentes vitesses, est proportionnelle aux carrés de ces vitesses; c'est-à-dire que si le vent agit directement contre une surface donnée, tantôt avec une vitesse de 6 mètres par seconde, et tantôt avec une vitesse de 3 mètres, les valeurs de l'impulsion, dans ces deux cas, seront dans le rapport de 36, carré de 6, à 9 carré de 3.

On comprend en effet que, lorsque le vent agit avec une vitesse double il y a, dans le même temps un nombre double de particules matérielles qui agissent, et comme elles agissent avec une vitesse double, l'action est évidemment quadruple.

Quant aux rapports des valeurs de l'impulsion du vent, avec une vitesse donnée, contre des surfaces de différentes dimensions, Borda a remarqué une chose fort singulière, c'est que les résistances des surfaces planes, ou en d'autres termes, la valeur de l'impulsion de l'air, croissent en plus grand rapport que les surfaces mêmes : par exemple, dit-il, les surfaces de 4 *pouces* en carré, et de 9 *pouces* en carré, sont entre elles comme 16 est à 81, tandis que les résistances que ces surfaces éprouvent sont entre elles comme 16 et $95\frac{1}{2}$. On ne peut pas attribuer cette différence au défaut des observations, parce qu'elle est un résultat moyen de plusieurs expériences fort exactes; d'ailleurs j'avais trouvé la même chose dans d'autres expériences, pour des surfaces d'un *pied* carré et de 6 *pouces* carrés; j'ai même, continue-t-il, réitéré l'épreuve sur des surfaces de 6 *pouces* en carré et de 3 *pouces* en carré, et j'ai trouvé que leurs résistances

étaient entre elles comme $4\frac{3}{4}$ est à 1, tandis que leurs surfaces étaient entr'elles seulement comme 4 est à 1.

Il semble donc qu'on peut conclure des diverses expériences et observations précédentes :

1°. Que la valeur de l'impulsion directe et perpendiculaire du vent, dont la vitesse est de 4 mètres par seconde, contre une surface de 1055 centimètres carrés, est d'environ 190 grammes ;

2°. Que l'action impulsive est proportionnelle aux carrés des vitesses du vent ;

3°. Enfin, qu'avec une vitesse donnée et des surfaces différentes, l'impulsion croît dans un plus grand rapport que ces surfaces, et, d'après les observations de Borda, à peu près comme $4\frac{3}{4}$ à 4.

Le calcul de l'impulsion du vent sur des surfaces planes exposées *obliquement* à sa direction, ainsi que sur des surfaces courbes, présente autant de difficultés que nous en avons trouvé pour l'eau dans les mêmes circonstances. Il paraît que la loi, d'après laquelle les fluides agissent obliquement sur des corps pour leur imprimer du mouvement, est fort compliquée, et que bien loin de pouvoir l'établir par des calculs théoriques, on n'est pas même encore parvenu jusqu'à présent à la déduire des différentes expériences qu'on a faites sur cette matière.

Ces expériences nous ont fait connaître du moins que la loi donnée par la théorie, d'après laquelle les actions obliques du vent seraient proportionnelles aux carrés du sinus des angles d'incidence, est formellement contredite par l'expérience, et qu'on ne doit la considérer que comme une supposition gratuite.

Si donc l'on avait besoin de connaître la valeur de l'impulsion du vent sur une surface plane exposée à sa direction, sous

un certain degré d'obliquité, ou sur une surface d'une certaine courbure, il faudrait recourir à l'expérience directe, et encore ne faire servir les résultats obtenus qu'à des cas tout-à-fait analogues ; car il est présumable que ce que l'expérience donne pour un certain degré d'obliquité ou pour une certaine courbure, varierait pour d'autres.

Néanmoins on pourrait conclure des expériences de Borda que la valeur des impulsions obliques du vent seraient à peu près proportionnelles aux sinus des angles d'incidence, lorsqu'il s'agit, par exemple, d'angles de 30 à 45 degrés; mais il fait lui-même la remarque que ce rapport peut changer pour des angles d'incidence plus ou moins aigus.

L'on peut conclure encore de ces mêmes expériences que l'action oblique du vent est plus puissante sur des surfaces planes que sur des surfaces courbes dont la convexité serait opposée au vent.

Dans cet état de choses, on voit manifestement qu'entre les faits que nous venons de recueillir, au sujet de l'impulsion du vent sur une surface en repos, ou, ce qui revient au même, de la résistance de l'air en repos à une surface en mouvement, on voit, disons-nous, qu'il y a une bien grande lacune entre ces faits et les moyens d'évaluer la puissance mécanique du vent, telle que l'industrie l'emploie.

Pour trouver des moyens d'évaluation, il faut recourir à de nouvelles expériences, aux diverses observations pratiques qu'on a pu faire. Deux hommes fort habiles s'en sont occupés spécialement, Coulomb et Smeaton; et c'est en nous appuyant sur leurs recherches que nous allons traiter la seconde question posée plus haut.

Elles laissent, ce nous semble, peu de chose à désirer, attendu qu'elles ont été faites sur le mode d'appliquer la force

du vent, non-seulement le meilleur, mais encore le plus en usage. Ce moteur ne se prête pas, comme les précédens, à une aussi grande variété de modes d'application; et les hommes, qui ont eu à s'occuper des dispositions propres à recevoir et à transmettre la puissance mécanique du vent, n'ont eu besoin de porter leur attention et leurs essais que sur un petit nombre de dispositions qui seules pouvaient s'accorder avec la manière dont le vent se présente comme force motrice. Ceci expliquerait peut-être comment on est parvenu généralement à tirer du vent presque tout le parti qu'on peut en attendre.

Des manières les plus avantageuses de recevoir et de transmettre l'action du vent au travail à faire, et des effets mécaniques qu'on en obtient.

Pour obtenir du vent une puissance mécanique capable de produire un travail industriel d'une certaine étendue, il faut présenter de grandes surfaces à son action; il faut que ces surfaces soient disposées de manière à prendre le vent, de quelque part qu'il vienne, et à se soustraire même en grande partie à son action, lorsqu'il se déchaîne avec violence. Ces conditions sont fondamentales, et c'est ce qui nous a fait dire plus haut que le nombre des modes d'application qu'on peut employer pour ce moteur est très-limité.

Pour s'emparer de l'action du vent, au moyen d'une grande surface qui lui est exposée, il faut évidemment qu'elle soit attachée d'une manière quelconque à un point fixe sur lequel ou autour duquel elle puisse osciller ou tourner; sans quoi la surface serait emportée indéfiniment, comme un vaisseau qui marche à force de voiles.

Mais une seule surface, une voile tendue par exemple, au

bout d'une pièce de bois oscillant sur un point fixe, peut être renversée par l'action du vent, et imprimer ainsi un mouvement instantané à cette pièce de bois. Pour faire durer, ou plutôt pour renouveler ce mouvement, il faudrait rappeler par un contre-poids cette pièce de bois avec la voile, à sa première position, afin de la remettre en prise au vent et de reproduire le même effet. On obtiendrait de cette manière un mouvement oscillatoire dont il est possible de tirer parti.

Cette supposition a été réalisée, et l'on a proposé une *bascule à voile* qui marchait comme nous venons de le dire; mais ce mode d'application semble n'offrir que quelques avantages précaires, et il n'est pas à notre connaissance qu'il soit en usage quelque part.

Il paraît donc que pour faire servir le vent de moteur, sans le secours d'aucune force étrangère, il faut que plusieurs surfaces soient disposées de telle façon que l'une étant entraînée en amène une autre au vent, et qu'ainsi elles se présentent successivement à son action; ou bien encore que par la situation particulière de chacune, par rapport au vent, elles tendent toutes ensemble à se mouvoir autour d'un point fixe, lorsqu'elles éprouvent l'impulsion du vent.

Supposons dès lors qu'on dispose, sur la circonférence d'une roue verticale ou horizontale, un certain nombre de voiles carrées, bien tendues sur un châssis léger, de la même manière qu'on place les aubes d'une roue hydraulique. Exposez cette espèce de roue à voiles à l'action du vent; il est évident que tant qu'elle restera toute entière en prise au vent, elle ne tournera pas et vous n'aurez point de moteur. En voici la raison : le vent, embrassant dans son action toute la roue, agit sur les voiles supérieures pour faire tourner cette roue dans un sens, et sur les voiles inférieures pour la faire tourner en sens con-

traire si elle est verticale ; et si elle est horizontale, il agit en même temps sur les voiles de droite et sur celles de gauche, et tend de même à faire tourner la roue dans un sens par les unes, et dans un sens contraire par les autres. Or, comme les voiles ont toutes la même surface, qu'elles se présentent de la même façon à l'action du vent, l'impulsion que reçoit une voile fait équilibre à celle qui frappe la voile opposée, et le mouvement n'a pas lieu.

Vous auriez deux moyens de faire tourner cette roue : le premier consisterait à renfermer une portion de la roue, pour ne laisser à découvert et en prise au vent que les voiles d'un seul côté; alors la roue tournera, parce que le vent ne pourra plus agir que de ce côté; le second serait d'ajuster les voiles de manière qu'elles se déploieraient en se présentant au vent d'un côté, et qu'elles se replieraient en se mouvant contre le vent de l'autre côté. C'est d'après ces principes que sont construits les moulins à vent qu'on nomme *horizontaux*.

Supposons maintenant qu'au lieu de la roue ci-dessus, vous mettiez en croix deux grandes pièces de bois qui représentent quatre bras, sur chacun desquels vous placerez à plat et dans le même plan, quatre voiles rectangulaires ; attachez cette croix par son centre sur un axe qui lui soit perpendiculaire, et exposez verticalement ces quatre ailes à l'action du vent, l'axe étant posé horizontalement sur des paliers qui supportent le tout.

Les quatre voiles recevront ensemble, dans le même moment, l'action du vent, et comme elles sont exposées directement et perpendiculairement à sa direction, ces voiles ne se mouvront pas autour de leur axe commun horizontal, et le vent ne produira d'autre effet que de tendre à renverser les voiles et l'appareil qui les supporte.

Voulez-vous imprimer un mouvement de rotation verticale à

ces voiles; inclinez-les toutes dans le même sens, sur chacun des bras qui les supportent; vous concevez qu'alors le vent qui vient les frapper de côté et toutes les quatre à la fois du même côté, les fait céder à son action dans le même sens et le mouvement de rotation est décidé et entretenu. Or, la construction des moulins à vent, dont les ailes tournent dans le plan vertical et qui sont le plus en usage, est fondée sur ces dispositions.

Nous commencerons par ceux-ci et nous nous y arrêterons plus long-temps, non-seulement parce qu'ils sont le plus en usage, mais encore parce qu'ils sont en général préférables aux moulins à vent, tournant dans le plan horizontal.

CHAPITRE XXXI.

Suite du même sujet. — Des moulins à ailes verticales.

Les moulins à vent tournant dans le plan vertical, qu'on nomme aussi plus brièvement *moulins à ailes verticales*, offrent à notre examen les questions suivantes :

1°. Dans ce mode de recevoir l'impulsion du vent, les ailes doivent-elles être *rigoureusement* dans le plan vertical, ou perpendiculaires à l'horizon?

2°. Quelle doit être l'inclinaison des ailes, et quelle est la forme la plus avantageuse qu'on puisse leur donner?

3°. Dans quel rapport doit être la vitesse des ailes avec celle du vent pour le *maximum* d'effet et quelle est la charge qui correspond à ce *maximum?*

4°. Quelle est la valeur de l'effet mécanique produit, avec des ailes de dimensions et une vitesse de vent données?

5°. Enfin quelle est l'influence de l'augmentation, soit de la vitesse du vent, soit de la surface des ailes en longueur ou en largeur, ou dans les deux dimensions à la fois, sur la quantité d'effet mécanique ou de travail produit?

Les ailes doivent-elles être rigoureusement dans le plan vertical ou perpendiculaire à l'horison.

On conçoit d'abord que le vent ne soufflant pas toujours du même côté, il est indispensable de construire les moulins verticaux, de manière à pouvoir en exposer les ailes à l'action du vent, quelle que soit la direction de celui-ci; c'est ce qu'on appele *orienter* le moulin. On indique dans l'atlas quelles sont les dispositions en usage pour opérer cet effet.

Une autre disposition est ensuite à prendre dans l'érection de ce genre de moulin : il ne paraît pas que le vent se trouve dans une direction parallèle à l'horizon; il est du moins généralement reconnu que des ailes élevées verticalement prennent moins bien le vent, que si l'on incline, de 8 à 15 degrés avec l'horizon, l'arbre qui porte les ailes.

La direction du vent serait même parallèle à l'horizon, que cette légère déviation du plan vertical dans le mouvement des ailes est peut-être encore avantageuse : l'accord qui règne sur ce point entre tous les constructeurs porte à le croire. Dans des questions aussi compliquées que celles qui concernent les effets du vent sur les ailes des moulins, l'usage fait loi, surtout lorsqu'il est fondé, comme ici, sur une disposition qui n'a pu se présenter la première à l'esprit, et qu'on n'a sans doute trouvée qu'à force de tâtonnemens; il est en effet plus naturel de placer horizontalement un arbre tournant, que de l'incliner légèrement à l'horizon, comme on le fait; et il est moins facile pour la construction de tirer parti du mouvement

de rotation d'un arbre ainsi incliné, que d'un arbre rigoureusement horizontal.

Quelle doit être l'inclinaison des ailes?

Nous avons dit plus haut que si la surface des ailes se présentait perpendiculairement à la direction du vent, le moulin ne tournerait pas et toute la force du moteur tendrait uniquement à le renverser.

Il faut donc que les ailes soient inclinées pour recevoir une impulsion oblique qui les fasse tourner dans le même sens; or plus l'inclinaison est grande, plus la surface de l'aile se dérobe à l'action du vent; et plus l'inclinaison est petite et se rapproche du plan perpendiculaire à la direction de ce moteur, plus l'impulsion que l'aile reçoit est puissante, mais dans le sens qui tend à renverser le moulin : il y a donc un certain degré d'inclinaison qui doit être le plus convenable de tous pour obtenir le *maximum* d'effet; c'est ce degré d'inclinaison qu'on a cherché par deux voies différentes, par le seul raisonnement et par l'expérience.

Ces deux voies n'ont pas mené aux mêmes résultats; et nous allons voir que cela devait être, et qu'ici comme ailleurs c'est encore à l'expérience qu'il faut s'en rapporter.

Voyons dans le premier cas comment on s'y est pris et comment on a raisonné.

Imaginons un axe GF (fig. 1re. à la fin du volume), disposé dans la direction du vent et lui présentant son extrémité G; qu'à ce point on ait ajouté en croix quatre ailes rectangulaires dont on voit une ABCD sur la figure et qui sont placées de manière que leurs plans fassent avec l'axe GF d'un côté l'angle obtus BGF, et de l'autre l'angle aigu FGC. Lorsque le vent vient frapper l'aile ABCD, selon la direction PQ

oblique à la surface de cette aile, son action se décompose évidemment en deux parties, l'une qui est perpendiculaire à la surface de l'aile et l'autre qui lui est parallèle.

Supposons que *l n* soit la vitesse du vent, ou l'espace qu'il parcourt dans une seconde de temps; *l r* représentera la vitesse parallèle par laquelle le vent est censé n'avoir aucune action sur l'aile; et *n r* sera la vitesse qui restera au vent pour choquer l'aile, sans néanmoins pouvoir exercer sur celle-ci tout l'effet que cette vitesse comporte.

L'aile A B C D est maintenue dans le sens *n* I, et ne peut céder directement et entièrement à la force représentée par *n r*. Une portion de celle-ci sera donc anéantie par cette résistance, et comme l'aile ne peut se mouvoir que dans le sens perpendiculaire à l'axe G F, il faut, pour trouver la puissance avec laquelle le vent tend à faire tourner l'aile, construire sur *nr*, comme diagonale, un parallélogramme dont les côtés seront pris sur *ln* et sur une perpendiculaire *m r* à *l n*. *m r* représentera donc la vitesse avec laquelle le vent agit sur l'aile pour la faire tourner; tandis que la puissance qui représente *n m* tend à renverser les ailes et se trouve par conséquent anéantie par la stabilité du moulin.

Or la portion *m r* de la force du vent, qui fait tourner l'aile, dépend de l'obliquité de l'impulsion, et augmente jusqu'à un certain point avec cette obliquité. D'un autre côté la largeur de la colonne de vent qui peut avoir prise sur l'aile est d'autant plus grande que cette aile se présente obliquement au choc, et dès lors la grandeur du choc dépend aussi de la projection C H de l'aile sur un plan perpendiculaire à la direction du vent. Il résulte donc de là que l'impulsion sera la plus grande, lorsque *m r* multiplié par C H sera un *maximum*; et l'on trouve, par les règles ordinaires du calcul, que ce *maximum* est pro-

duit, lorsque l'angle *lno* que fait la direction du vent, et par conséquent l'angle F G C que fait l'axe avec le plan de l'aile est de 54 $\frac{3}{4}$ degrés, ou en nombre rond de 55 degrés.

Il est bon de remarquer avant d'aller plus loin qu'on peut désigner de deux manières l'angle d'inclinaison qu'on donne aux ailes, soit par rapport à l'axe de leur rotation, soit par rapport au plan de leur mouvement; au reste, les deux angles ainsi désignés sont complémens l'un de l'autre. L'inclinaison de 55° trouvée ci-dessus, est prise comme il est dit, par rapport à l'axe de rotation; elle serait de 35° si on la prenait par rapport au plan du mouvement. La pratique a adopté ce dernier mode de désignation et nous l'emploîrons aussi de préférence à l'autre. Donner une inclinaison quelconque aux ailes s'appelle *airer* le moulin ou les ailes.

Mais revenons aux résultats trouvés par le calcul, relativement à l'*airage* de l'aile; calcul qui donne 35 degrés d'inclinaison pour le *maximum* d'effet.

Afin d'arriver à un résultat, il a fallu supposer 1°. que l'impulsion était comme le carré du sinus de l'angle d'incidence; 2°. qu'elle était comme le carré de la vitesse du vent; 3°. que l'aile était en repos.

Or nous avons vu plus haut que la première supposition n'était pas admissible; les expériences de Borda ont montré que l'impulsion n'est pas comme le carré du sinus de l'angle d'incidence. Quant à la seconde, l'expérience la confirme; mais la troisième est purement gratuite; elle n'a été faite que pour la commodité du calcul, et la valeur de l'impulsion sur une aile en repos ne peut rien apprendre concernant le *maximum* d'effet à obtenir; c'est le degré d'action sur une aile en mouvement qu'il importe de connaître: d'où il suit qu'en jugeant la méthode ci-dessus comme simple procédé d'investigation, il est impossi-

ble d'admettre comme applicables les résultats qu'elle a fournis; au surplus nous verrons bientôt l'expérience les contredire.

Pour chercher par le raisonnement la valeur de l'impulsion du vent sur des ailes qui se meuvent, il faut considérer qu'elles ne suivent pas la direction du vent, dans leur mouvement, mais qu'elles tournent dans un plan perpendiculaire à cette direction; de sorte que la vitesse qu'elles acquièrent ne peut en aucun cas les soustraire à l'action du vent; cette vitesse s'accélère donc de plus en plus, jusqu'à ce que la somme des résistances limite cet accroissement et amène le mouvement uniforme.

Il faut considérer encore que les différentes portions de chaque aile, depuis le centre du mouvement jusqu'à leurs extrémités tournent avec des vitesses très-différentes, et que les portions inférieures doivent recevoir le choc du vent qui a une vitesse plus grande que la leur; tandis que les portions qui se trouvent dans les extrémités choquent elles-mêmes le vent qui n'a pas autant de vitesse qu'elles en ont.

On conçoit dès lors combien devraient être longs et difficiles les calculs au moyen desquels on voudrait saisir toutes ces nuances et une foule d'autres qu'on ne peut pas apprécier, ou qu'on ne connaît pas.

Plusieurs grands géomètres l'ont tenté en conservant toutefois les deux premières suppositions dont nous avons parlé plus haut : ils ont trouvé une théorie fort compliquée; mais il ne paraît pas qu'on puisse en déduire la meilleure manière *d'airer* l'aile d'un moulin. On y voit bien qu'en supposant chaque aile divisée transversalement en plusieurs parties, chaque partie doit avoir une inclinaison particulière, et dans quels rapports semblent devoir varier les diverses inclinaisons partielles de

l'aile; mais l'angle d'inclinaison dont il faudrait partir pour régler les autres y reste indéterminé.

L'expérience est donc la seule voie qui s'offre à nous pour arriver à la solution de la question qui nous occupe, sur l'inclinaison la plus avantageuse et la meilleure forme à donner aux ailes verticales d'un moulin.

Smeaton a fait une suite de recherches expérimentales sur les moulins verticaux; nous nous appuyons avec d'autant plus de confiance sur les résultats qu'il a donnés à ce sujet, que les observations de Coulomb sur de grands moulins à vent nous paraissent les confirmer tous.

Smeaton n'a pas exposé un modèle de moulin à vent à l'action de celui-ci; il eût été long et difficile par ce moyen d'étudier toutes les questions que ce moteur présente : les changemens de vitesse, de direction, en un mot les fréquentes variations auxquelles le vent est sujet, auraient à chaque instant jeté le trouble dans les observations, et interrompu le fil des recherches que souvent on n'aurait pu renouer qu'à de très-longs intervalles.

Il a préféré, et, ce nous semble, avec raison, de faire mouvoir le modèle de moulin dont il s'est servi dans l'air en repos : ainsi, au lieu de recevoir l'impulsion de l'air sur les ailes, il a frappé celui-là avec celles-ci; ce qui est beaucoup plus commode, et paraît d'ailleurs offrir les mêmes résultats.

Le moulin était établi à l'extrémité d'un bras de levier horizontal, auquel on imprimait un mouvement de rotation dont on variait à volonté la vitesse; le moulin, portant verticalement sur ce bras de levier, frappait l'air par ses ailes avec une vitesse exactement déterminée; on comprend aisément que la vitesse que prenait tout le système à l'extrémité du bras de levier représentait celle du vent et en faisait les fonctions.

L'appareil en outre était disposé de manière à pouvoir changer à volonté l'inclinaison des ailes en tout ou en partie, ainsi que leurs formes et leurs dimensions.

Une corde s'enroulait par une extrémité sur l'arbre horizontal portant en croix les quatre ailes, et un plateau qu'on chargeait de poids à volonté était attaché à l'autre extrémité. Les ailes, en tournant, élevaient le plateau au moyen de poulies de renvoi, dont la disposition est facile à imaginer.

Dans les premières expériences que fit Smeaton pour déterminer le degré d'inclinaison des ailes, correspondant au *maximum* d'effet, il se servit d'ailes *planes* et de l'inclinaison de 35 degrés sur le plan du mouvement, et, si l'on veut, de 55 degrés sur l'axe de rotation, inclinaison indiquée par les méthodes dont nous avons parlé ci-dessus. Il trouva en multipliant le nombre de révolutions des ailes par le poids élevé, que le produit qui correspondait au *maximum* d'effet, dans cette première série d'expériences, était le *plus petit* qui résultât des divers degrés d'inclinaison d'ailes qu'il crut devoir soumettre à ses recherches.

Il remarqua toutefois que, s'il ne s'agissait que de déterminer l'angle sous lequel les ailes doivent être disposées pour passer avec le plus de facilité du repos au mouvement, ou pour résister avec plus de force aux efforts qui tendraient à les arrêter, lorsqu'elles sont en mouvement, il remarqua, disons-nous, que l'inclinaison de 35 degrés serait la meilleure : il vit en effet que le poids employé pour arrêter le mouvement des ailes inclinées à 35 degrés fut plus grand qu'avec d'autres inclinaisons à égalité de surface.

Ce résultat semble naturel, si l'on considère que le calcul qui a donné cette inclinaison est fondé sur la supposition que l'aile est en repos et ne reçoit l'impulsion que dans cet état.

Mais si l'on veut disposer les ailes de telle façon qu'avec des dimensions données elles produisent le plus grand effet possible, qu'elles exécutent le plus de travail, en un temps donné, on rejettera entièrement, d'après les expériences de Smeaton et les règles ordinaires de la pratique, le degré d'inclinaison dont il s'agit; et si l'on se sert de voiles *planes*, on donnera à l'angle d'inclinaison de l'aile avec le plan de son mouvement, de 15 à 18 degrés dont les complémens sont, comme on sait, de 75 à 72 degrés (rappelons-nous que le plan du mouvement des ailes est perpendiculaire à la direction du vent); ainsi il ne faut pas que cette inclinaison soit jamais pour des voiles *planes*, ni plus petite que 15 degrés, ni plus grande que 18 degrés.

Dans la comparaison que Smeaton fit des ailes inclinées à 35 degrés, et de celles inclinées sous les angles compris entre 15 et 18 degrés, il trouva que les produits correspondans au *maximum* d'effet sont dans le rapport de 31 à 45 en faveur du plus petit angle d'inclinaison sur le plan du mouvement; il remarqua aussi qu'une variation d'un ou de deux degrés dans l'angle d'inclinaison des ailes ne produit qu'une très-légère différence dans l'effet, quand l'angle approche d'être le plus avantageux possible.

Pour construire les ailes d'après la loi suivant laquelle les géomètres dont nous avons parlé ci-dessus proposent de faire varier l'angle formé par la direction du vent et les différentes parties de l'aile, suivant le degré de vitesse dont chaque partie est animée, il faut déterminer l'inclinaison à donner à une des portions transversales quelconque de l'aile, et suivre pour le reste les indications de la formule.

Smeaton en fit l'essai : il disposa l'aile de manière que l'angle formé par l'élément transversal de cette aile, au milieu de la

distance comprise entre le centre et l'extrémité, avec le plan du mouvement, fût de 15 degrés 41 minutes, comme l'un des angles les plus avantageux que l'expérience donnait avec des voiles planes; dans lequel cas la vitesse de cette partie de l'aile, supposée chargée de plus grands poids, serait égale à la vitesse du vent.

La position de cet élément transversal étant ainsi déterminé, les autres élémens ou portions d'ailes furent inclinés ainsi qu'il suit, conformément au théorème de Maclaurin :

A la 6e. partie de la voile en partant du centre, l'inclinaison sur le plan du mouvement fut de. . . . . 26° 54′
Aux $\frac{2}{6}$ de . . . . 20° 6′
A la $\frac{1}{2}$ de. . . . . 15° 41′
Aux $\frac{2}{3}$ de . . . . 12° 40′
Aux $\frac{5}{6}$ de . . . . 10° 53′
A l'extrémité de . . . . 9°

Smeaton trouva qu'on obtenait autant d'avantage avec des ailes planes inclinées de 15 à 18 degrés, qu'avec ces ailes courbes.

Il remarqua en outre avec raison, à ce sujet, que la surface d'une aile engendrée d'après la loi suivie ci-dessus, présente une surface convexe à l'action du vent, tandis que les Hollandais et d'autres constructeurs forment cette surface de telle façon qu'en diminuant l'angle d'inclinaison des portions transversales de l'aile, depuis le centre jusqu'à son extrémité, elle présente à l'action du vent une surface concave.

L'auteur fit une suite d'expériences sur des ailes dont les élémens transversaux variaient d'inclinaison, de manière à présenter au vent une surface concave. Il reconnut qu'en adoptant des angles convenables pour chaque portion d'aile, depuis le

point le plus rapproché du centre de rotation, jusqu'à l'extrémité de l'aile, on obtenait plus d'effet d'ailes concaves que d'ailes convexes, à égalité de surface; et que dès lors, quand le vent agit sur une surface concave, il résulte de cette disposition un avantage pour la puissance de l'aile considérée dans toute son étendue; bien que chaque portion transversale, prise isolément, ne paraisse pas disposée de la manière la plus avantageuse.

Il conclut enfin, de différentes expériences faites en grand, que l'on obtient des résultats aussi avantageux que possible, en inclinant les élémens des ailes, suivant les angles indiqués ci-dessous.

Le rayon, sur lequel la voile est appuyée, est divisé en 6 parties. Le premier élément, en partant du centre, est désigné par 1, dans le tableau suivant, et celui qui correspond à l'extrémité de l'aile est désigné par 6.

ÉLÉMENS.	ANGLE fait avec l'axe.	ANGLE fait avec le plan du mouvement.
1. .	72°.	. . . . 18°
2. .	71°.	. . . . 19°
Milieu de l'aile. 3. .	72°.	. . . . 18°
4. .	74°.	. . . . 16°
5. .	77° ½.	. . . . 12° ½
Extrémité de l'aile. 6. .	83°.	. . . . 7°

Dans les moulins que Coulomb a observé dans les environs de Lille, et qu'il regarde comme approchant de la perfection, la disposition des ailes est telle qu'elles forment du côté frappé par le vent, un angle sensiblement concave au commencement de l'aile, et qui, allant toujours en diminuant s'évanouit à l'extrémité de l'aile; il estime que l'inclinaison des élémens transversaux, sur l'axe de rotation, forme au commencement de

l'aile un angle de 60 degrés et qu'à l'extrémité cet angle serait de 78 degrés à 84 degrés, ou en prenant l'inclinaison par rapport au plan du mouvement, l'angle du premier élément en partant du centre, serait de 30 degrés et celui qui correspond à l'extrémité de l'aile serait compris dans les limites de 12 à 6 degrés.

On voit que les indications de Smeaton s'accordent avec les observations de Coulomb pour la forme de l'aile; et quant à la différence de 11 à 12 degrés qu'elles donnent pour la première portion de l'aile, nous remarquerons que les constructeurs varient presque tous sur ce point, et il paraît qu'on peut prendre un angle d'inclinaison quelconque entre 18 degrés indiqués par Smeaton, et 30 degrés observés par Coulomb, sans nuire sensiblement à l'effet du moulin.

Après avoir déterminé la meilleure manière *d'airer* les ailes, Smeaton chercha l'avantage qui pourrait résulter d'une augmentation de surface, la longueur des ailes restant la même; il ajouta donc, le long de chaque aile airée de la manière la plus convenable, une voile triangulaire de la même longueur et d'une base égale à la demi-largeur de l'aile. La surface ainsi augmentée, était à la première dans le rapport de 5 à 4. L'on reconnut par diverses expériences, que la position de l'aile, ainsi élargie, était la plus avantageuse, lorsque chaque élément transversal faisait avec le plan du mouvement un angle de $2\frac{1}{2}$ degrés plus grand que celui qu'on avait trouvé le plus convenable pour l'élément correspondant, avant l'addition de la voile triangulaire. Smeaton conclut de là qu'une aile plus large doit être inclinée sous un angle plus grand. Ces mêmes expériences lui firent apercevoir aussi qu'une aile plus large à son extrémité que près du centre, est plus favorable à l'effet qu'une aile en forme de rectangle allongé, et il ajoute que la disposition et la figure d'ailes élargies qui lui ont paru le mieux réussir en grand,

sont comme on le voit (fig. 2) à la fin du volume. Le barreau *aa* de l'extrémité de l'aile est égal au tiers du rayon ou du fouet *bb*; ce barreau extrême est divisé par le fouet dans le rapport de 3 à 5; la voile triangulaire est couverte de planches *cc*, depuis son extrémité inférieure jusqu'au tiers de sa longueur; le reste est couvert de toile comme à l'ordinaire; les angles *d'airage* indiqués plus haut paraissent aussi convenir le mieux pour les ailes élargies. La pratique fait voir cependant qu'il est généralement plus avantageux de donner plutôt moins que plus d'airage.

Quelques personnes ont imaginé que plus les ailes présentent de surface, plus la machine offre d'avantage : elles ont proposé en conséquence de couvrir de voiles la surface entière, comprise ntre les rayons des ailes, de manière qu'en faisant de chacune un *secteur d'ellipse,* suivant la proposition de *Parent,* le cylindre de vent, qui agit sur les ailes fût entièrement intercepté et devînt ainsi capable de produire le plus grand effet possible.

Smeaton a cherché par expérience jusqu'à quel point l'effet peut être augmenté par l'accroissement de la surface des ailes, sans s'attacher néanmoins à donner à ces nouvelles ailes une surface plane et une angle d'inclinaison de 35 degrés, ainsi que *Parent* le proposait; attendu qu'il était reconnu que cette inclinaison ne pouvait avoir aucune influence pour rendre l'effet le plus grand possible; il donna à l'extrémité de l'aile 12 degrés d'inclinaison et 22 degrés à l'élément le plus incliné.

Ses expériences lui ont prouvé qu'au delà d'une certaine limite, plus la surface de l'aile est grande, et moindre est l'effet de la machine, proportionnellement à cette surface; et que, dans le cas où le cylindre de vent est totalement intercepté par les ailes, il ne produit pas le plus grand effet parce qu'il manque d'issues convenables pour s'échapper, après avoir exercé son action.

Ce n'est pas seulement dans la vue de laisser au vent la liberté de s'échapper, après son impulsion, qu'on ne donne pas aux voiles trop de largeur, mais encore pour se mettre à l'abri des accidens que la violence du vent pourrait occasioner, sur des ailes qui, laissant entre elles trop peu d'espace pour le passage du vent, auraient peine à résister à cette violence.

On ne peut mieux faire au reste, pour ce qui regarde la largeur, que de se conformer aux usages généralement reçus; et pour la forme et la position des ailes, à ce que nous avons dit plus haut; ce qui n'est au surplus que la description fidèle de ce que font les meilleurs constructeurs de moulins à vent.

Dans quel rapport doit être la vitesse des ailes avec celle du vent pour le maximum *d'effet, et quelle est la charge qui correspond à ce* maximum?

Pour exprimer le rapport qui, d'après l'expérience, doit exister entre la vitesse du vent et celle des ailes, correspondantes au *maximum* d'effet, il faut évidemment déterminer le point de l'aile sur lequel on prendra la vitesse.

Pour une roue hydraulique nous avons pris la circonférence extérieure, ou l'extrémité du rayon, comme le point le plus commode et le plus facile à désigner et à évaluer; pour les ailes d'un moulin à vent, nous prendrons de même l'extrémité de l'aile ou du rayon.

Nous avons trouvé pour l'impulsion de l'eau, que l'aube, ou le point d'application du moteur ne peut jamais avoir la même vitesse que celui-ci, et produire un effet mécanique; parce que l'aube fuit et se soustrait à l'impulsion; le terme qui exprime la vitesse de l'eau, par rapport à celui qui représente la vitesse de la roue, correspondante au *maximum* d'effet, est nécessairement toujours plus grand que ce dernier terme.

Il n'en est pas de même des ailes verticales d'un moulin à vent : la vitesse de leurs extrémités, même lorsqu'elles sont chargées au *maximum*, est beaucoup plus grande que la vitesse du moteur; parce qu'ainsi que nous l'avons remarqué plus haut, l'aile reste constamment en prise à l'action du vent et ne fuit pas devant l'impulsion, comme l'aube d'une roue; d'où il résulte que le terme qui exprime la vitesse de l'extrémité de l'aile, dans le cas du *maximum* d'effet, est toujours plus grand que ce dernier terme.

Mais la vitesse du vent étant donnée, quelle est la vitesse de l'extrémité de l'aile non chargée, et chargée au *maximum* d'effet?

Les recherches de Smeaton et de Coulomb s'accordent pour répondre à cette question.

La forme des ailes à leur extrémité influe sur la valeur de ce rapport; elle varie suivant les habitudes, peut-être même selon le caprice des constructeurs. 1°. Ou ces extrémités sont parallèles au plan de rotation, c'est-à-dire placées à angle droit sur la direction du vent et de l'axe; 2°. ou elles sont inclinées d'environ 7 degrés; 3°. ou enfin elles sont élargies, ainsi que nous l'avons dit plus haut.

Dans le premier cas, les extrémités de ces ailes *non chargées* ont une vitesse qui est à celle du vent comme 4, 2 est à 1, et lorsqu'elles sont chargées au *maximum* leur vitesse, comparée à celle du vent, est dans le rapport de 3, 3 à 1.

Dans le second cas, les extrémités de ces ailes *non chargées* ont une vitesse qui est à celle du vent, comme 4 est à 1. Lorsqu'elles sont chargées au *maximum*, leur vitesse comparée à celle du vent est dans le rapport de 2, 7 à 1.

Dans le troisième cas, la vitesse des extrémités, sans charge, est à la vitesse du vent comme 4 est à 1, et avec charge au *maximum*, comme 2, 6 est à 1.

On peut tirer de ces données expérimentales deux déductions utiles à la pratique.

La première servira à déterminer la vitesse du vent, par la mesure toujours facile de la vitesse des ailes non chargées à leurs extrémités : on sait que pour avoir cette dernière vitesse il suffit de connaître la longueur des ailes et le nombre des révolutions en un temps donné, en une minute, par exemple, que les ailes font, lorsque le moulin tourne à vide, ou sans charge. Or en divisant la vitesse trouvée par 4,2, si l'extrémité de l'aile est parallèle au plan de rotation, par 4, si elle est inclinée de 7 degrés environ, ou si elle est élargie, on aura la vitesse du vent.

La seconde servira à faire connaître si un moulin en activité est chargé ou non au *maximum ;* pour cela on mesurera la vitesse du vent, et si les ailes de la première espèce ont une vitesse 3 fois et 3 dixièmes plus grande ; celles de la seconde espèce 2 fois et 7 dixièmes, et celles de la troisième espèce 2 fois et 6 dixièmes plus grandes que celles du vent, la charge du moulin est approximativement celle qui donne le *maximum* d'effet.

Smeaton a consulté l'expérience pour savoir dans quel rapport se trouve la vitesse des ailes sans charge, avec celle des ailes chargées au *maximum* d'effet ; il a reconnu, par beaucoup d'observations sur des ailes de différentes constructions, que ce rapport est en général celui de 3 à 2 à peu de chose près ; ainsi lorsque des ailes sans charge font 6 tours par minute, elles sont chargées du poids qui correspond au *maximum* d'effet, lorsqu'elles font 4 tours avec la même vitesse de vent.

Il a remarqué en outre, et les observations de Coulomb confirment cette remarque, que la vitesse des ailes, de forme et d'inclinaison semblables, sans charge ou chargées au *maxi-*

mum d'effet, est proportionnelle à la vitesse du vent, c'est-à-dire qu'avec une vitesse de vent double ou triple, les ailes prennent une vitesse double ou triple.

Quant au poids correspondant au *maximum* d'effet, que des ailes de forme et d'inclinaison données peuvent élever, il résulte de plusieurs expériences de l'auteur, que ce poids est, à $\frac{1}{10}$ près environ, proportionnel au carré de la vitesse du vent; ainsi lorsque le vent agit sur un moulin avec une vitesse double, le poids ou la charge, pour correspondre au *maximum* d'effet, doivent être quadruples.

Quelle est la valeur de l'effet mécanique produit avec des ailes de dimension et une vitesse de vent données ?

Nous avons vu plus haut, 1°. dans quel rapport se trouvait la vitesse des trois meilleures espèces d'ailes avec la vitesse du vent, sans charge ou chargées au *maximum;* 2°. quelle vitesse les ailes chargées doivent avoir comparativement à leur vitesse sans charge, pour que le poids soit un *maximum.* 3°. dans quel rapport le poids doit croître pour être un *maximum*, lorsque le vent vient agir avec plus de vitesse.

Il s'agit maintenant d'évaluer l'effet mécanique produit, ou, en d'autres termes, le travail que peut faire un moulin avec des ailes et une vitesse de vent données.

Les deux auteurs cités plus haut, ont obtenu les résultats suivans :

Le rayon des ailes du petit moulin dont Smeaton s'est servi, était de 533^{mil},394, la longueur de la voile qui couvrait le rayon était de 457^{mil},194, et sa largeur de 142^{mil},238; l'angle à l'extrémité de l'aile était de 7 $\frac{1}{2}$ degrés. Vingt tours des ailes de ce moulin élevaient le poids à 287^{mil}. Le modèle mis en expérience, on remarqua que. sous une vitesse de vent d'à peu près 2^{m},667, les

ailes faisaient en une minute 130 révolutions avec une charge de $7^k.,948$; or, puisqu'en vingt révolutions le poids était élevé à $287^{mil}.$, le poids de $7^k.,948$ le fut avec 130 révolutions à $1865^{mil}.$ environ en une minute; donc l'effet mécanique produit était équivalent à $14^k.,823$ à $1^m.$ de hauteur.

Le rayon des grands moulins observés par Coulomb, dans la Flandre, était de 12 mètres 344 de longueur, et la largeur de l'aile d'environ 1 mètre, 95.

En examinant l'effet de ces moulins, dit Coulomb, la première observation intéressante qui s'est présentée, c'est qu'avec un vent moyen, que l'on peut estimer de $5^m.$ 85 à $6^m.50$ par seconde, plus de 50 moulins placés à un quart de lieue de Lille, dans la même exposition, produisaient à peu près la même quantité d'effet, quoiqu'il y eût plusieurs petites différences dans la construction de ces moulins, soit relativement à l'inclinaison de l'axe de rotation, soit relativement à la disposition des ailes : de cette observation l'on peut, ce semble, tirer une conclusion bien intéressante, c'est qu'il est probable qu'à force de tâtonnemens la pratique s'est très-rapprochée du degré de perfection; car si l'on cherchait par les règles *de maximis et minimis*, quelle que soit la formule qui exprimerait l'effet de notre moulin, quel devrait être le rapport de toutes les quantités variables qui la composent, pour que cet effet fût un *maximum*, l'on trouverait, d'après les principes fondamentaux de ce calcul, qu'en faisant varier, dans cette formule, une ou plusieurs des indéterminées, la variation de l'effet devrait toujours être supposée égale à zéro, ou, ce qui revient au même, que, quoique l'on fît un peu varier les différentes parties de ce moulin, l'effet resterait toujours constant. Or nous trouvons ici que, bien que les constructeurs de moulin varient entre eux dans les dispositions des ailes, l'effet avec un vent moyen, est

toujours constant. Ainsi, il est probable que les parties en sont disposées de manière qu'elles produisent à peu près le *maximum* d'effet que nous désirons.

Voici actuellement, continue Coulomb, dont nous citons ici les expressions, les expériences d'après lesquelles nous avons cru pouvoir évaluer l'effet de nos moulins pour une année moyenne.

L'on observait et l'on mesurait la vitesse du vent avec des plumes très-légères que le vent entraînait.

1re. *Expérience.* Le vent parcourt 2^{m}, 274 par seconde; lorsque le moulin est libre, et lorsque aucun des pilons n'est élevé, les ailes du moulin font 5 $\frac{1}{2}$ tours par minute; mais en mettant en action un seul pilon pesant 499^{k}, 296, qui s'élève *deux fois* à 0^{m}, 487 de hauteur à chaque tour d'aile, le moulin fait à peine trois tours par minute.

2e. *Expérience.* Le vent parcourant environ 4 mètres par seconde, les ailes font 7 à 8 tours par minute; il n'y a que deux pilons, un de 499^{k},296 et l'autre de 244^{k},753, ensemble 744^{k},049, qui s'élèvent comme dans la première expérience. Avec ce dégré de mouvement, le moulin ne peut fabriquer qu'une tonne, ou 97^{k}, 901 d'huile en 24 heures.

3e. *Expérience.* Le vent parcourant 6^{m}, 496 par seconde, les ailes font 13 tours dans une minute; 5 pilons de 499^{k}, 296 chacun, ainsi qu'un pilon de 244^{k},753, ensemble 2741^{k}, 233 sont mis en action comme ci-dessus; les quatre ailes du moulin portent toute leur voilure, et l'on fabrique trois tonnes et demie d'huile en 24 heures. Ce degré de vitesse dans le vent est celui qui paraît convenir le mieux à cette machine; c'est au moins celui que le conducteur préfère. Il n'est pas forcé de travail; ce vent souffle assez ordinairement avec une vitesse assez uniforme; le moulin porte toute sa voilure sans crainte d'ac-

cident, et sans que les liaisons de sa charpente soient trop fatiguées.

4e. *Expérience*. Le vent souffle avec force; il parcourt 9^m, 095 par seconde; les conducteurs des moulins sont obligés de serrer 1^m, 949 de voile à l'extrémité de chaque aile. L'aile fait 17 à 18 tours dans une minute, et le moulin fabrique près de 5 tonnes d'huile en 24 heures; les cinq pilons de 499^k, 296 chacun, ainsi qu'un pilon de 244^k,753, sont en action.

5e. *Expérience*. Les moulins à blé dont l'engrenage est disposé de manière que la meule fait cinq tours dans le temps que l'aile en fait un, ne commencent à tourner que lorsque la vitesse du vent est de 3^m,248 à 3^m,898 par seconde; lorsque la vitesse du vent est de 5^m,848 par seconde, les ailes du moulin font 11 à 12 tours par minute, et les moulins peuvent moudre, sans bluter, de 392 à 440 kilog. par heure. L'on doit remarquer qu'avec ce degré de vent, les moulins à huile font également de 11 à 12 tours par minute; en sorte que dès que l'on aura calculé pour un vent de 5^m, 848 par seconde la quantité d'effet que produit notre moulin à huile, l'on évaluera très-aisément la valeur de la résistance de la meule qui broie le grain.

Lorsque le vent a 9^m, 095 de vitesse par seconde, les ailes du moulin à blé, portant toute leur voilure, font souvent jusqu'à 22 tours par minute, et peuvent moudre jusqu'à 882 kilogrammes par heure. J'ai vu quelquefois les meuniers faire travailler leur moulin avec ce degré de vitesse, malgré le degré énorme de chaleur que la farine contracte en sortant de dessous la meule; ils sont cependant obligés pour lors de changer de temps en temps l'espèce de grain qu'ils soumettent à la mouture, pour rafraichîr, disent-ils, leur meule.

D'après les expériences qui précèdent, Coulomb détermine ainsi qu'il suit l'effet annuel que les moulins produisent.

Par un relevé fait du travail de ces moulins, pendant plusieurs années, j'ai trouvé qu'ils fabriquent année moyenne 400 tonnes d'huile. Or comme la fabrique d'une tonne d'huile exige à peu près la même quantité de coups de pilons pour réduire la graine en pâte, nous tirerons facilement de nos expériences la quantité de coups de pilons nécessaires pour la fabrication de 400 tonnes, ou, ce qui revient au même, le nombre de coups de pilons donnés dans une année moyenne.

Nous avons trouvé, dans la 3ᵉ. *expérience*, qu'avec la vitesse moyenne du vent, qui est de $6^m,496$ par seconde, les ailes du moulin à vent font 13 tours dans une minute, et qu'il y avait pour lors 6 pilons pesant ensemble $2741^k,233$ élevés *deux fois* à $0^m,487$ de hauteur, à chaque révolution des ailes; l'effet produit sera donc équivalent à 13 fois le produit du poids total de ces pilons, par le double de $0^m,487$, c'est-à-dire à 34728^k élevés à 1^m à peu près de hauteur dans une minute; ce qui donnerait en nombre rond, pour 24 heures, un poids de 490^k élevé à 102006^m. Nous trouvons actuellement dans cette même expérience, que lorsque ce moulin a ce degré d'action il fabrique 3 tonnes et demie d'huile par jour. Ainsi, puisqu'il fabrique, année moyenne, 400 tonnes, et que pour fabriquer une tonne il faut le même nombre de coups de pilons, notre moulin travaille avec l'action due à un vent dont la vitesse moyenne est de $6^m,496$ par seconde pendant 114 jours de chaque année; et comme les moulins sont arrêtés les dimanches et fêtes, l'on peut évaluer leur travail continu, sur le pied que nous venons de trouver, au *tiers* de l'année; ou, ce qui revient au même, l'on peut supposer que ces moulins travaillent toute l'année 8 heures par jour, en élevant un poids de 34728^k à 1^m de hauteur par minute. Ces nombres représentent l'effet utile de la puissance du vent. Coulomb évalue à $\frac{1}{6}$ les résistances dues aux

frottemens et aux chocs des pièces de la machine; la force du vent est donc réellement un sixième plus grande en la considérant en elle-même.

Il serait superflu de chercher ici, comme nous l'avons fait pour l'eau, le rapport entre la puissance mécanique dépensée et l'effet produit, en prenant soit l'expérience citée plus haut de Smeaton, soit celle de Coulomb : le cylindre de vent, dont la base répond au cercle décrit par les ailes d'un moulin, n'agit pas tout entier; une portion s'échappe dans l'intervalle des ailes, sans exercer aucune impulsion, ou du moins, si elle agit, ce ne peut être que faiblement, et quand la vitesse des ailes est très-grande.

Ce qui importe lorsqu'on se sert d'une puissance aussi indépendante dans son action que l'est celle dont nous nous occupons, c'est de savoir quel travail on peut faire, quel effet mécanique on peut produire, avec des ailes de telles dimensions, et avec les vitesses moyennes des vents qui souflent habituellement dans la contrée où doit se faire le service de ce moteur.

Si l'on se renfermait dans les dimensions du modèle dont Smeaton s'est servi pour évaluer l'effet mécanique, ou dans celles des moulins observés par Coulomb, on pourrait s'en rapporter aux résultats qu'ils ont obtenus, et les appliquer toutes les fois que le vent aurait la vitesse qu'il avait dans leurs expériences.

Mais entre ces dimensions observées par Smeaton et celles qui l'ont été par Coulomb il y a une infinité d'intermédiaires que l'on peut vouloir employer.

D'un autre côté, la vitesse du vent est variable de sa nature; il faut donc apprendre à évaluer l'effet que le vent peut produire dans des circonstances différentes : c'est l'objet que nous nous proposons dans la question suivante.

Quelle est l'influence de l'augmentation soit de la vitesse du vent, soit de la surface des ailes en longueur ou en largeur, ou dans les deux dimensions à la fois, sur la quantité d'effet mécanique ou de travail produit ?

Les expériences de Smeaton vont nous servir de base, parce qu'ainsi que nous l'avons déjà dit, elles s'accordent assez bien avec les observations de Coulomb sur de grands moulins, et parce qu'il a pu varier ses expériences autant qu'il l'a jugé convenable; ce que Coulomb a regretté de ne pouvoir faire.

Il s'agit de connaître l'influence et des variations de vitesse de vent, et des dimensions d'ailes sur l'effet produit. Partons d'abord d'un point fixe, d'une donnée expérimentale positive, et rappelons-nous ce qui a été dit dans la question précédente, qu'avec une vitesse de vent de $2^{m},667$ par seconde, Smeaton a obtenu un effet mécanique équivalent à $14^{k},823$ élevés à 1^{m}, en une minute, avec un moulin dont le rayon de l'aile était de $533^{mil},394$, la longueur de la voile de $457^{mil},194$, et sa largeur de $142^{mil},238$, dans le cas du *maximum* d'effet.

Supposons donc que toutes les dispositions de ce moulin restent les mêmes ainsi que la charge que nous avons vu plus haut être de $7^{k},948$ au *maximum* d'effet avec une vitesse de vent de $2^{m},667$ par seconde; supposons, disons-nous, que cette vitesse vienne tout à coup à changer, quel en sera l'effet ? Une suite d'expériences a montré, 1°. que l'accroissement d'effet, l'accroissement de la vitesse *étant supposé faible*, sera à peu près comme le carré de cette vitesse.

2°. Si la vitesse du vent est *double*, les effets seront à peu près comme 10 est à $27 \frac{1}{7}$.

3°. Enfin si la vitesse est *plus que double*, la charge étant toujours la même et correspondant au *maximum* d'effet,

dans le cas où la vitesse du vent est plus de deux fois moindre, les effets croîtront à peu près dans le rapport simple de la vitesse.

Avec ces règles, il est facile d'évaluer les divers effets produits par ce petit moulin lorsque le vent seul vient à changer. Mais il ne faut pas oublier que pour obtenir le *maximum* d'effet la charge doit varier à chaque changement de vitesse du vent, conformément à ce que nous avons dit en traitant la seconde question.

Nous remarquerons avec Smeaton, au sujet de ces règles, qu'ainsi que nous l'avons vu plus haut, le nombre des révolutions des ailes augmente dans le même rapport que la vitesse du vent, même lorsqu'elles sont chargées d'un poids proportionnel au carré de leur vitesse. Donc si la charge n'est point augmentée de manière à ce qu'elle soit proportionnelle au carré de la vitesse, le nombre de révolutions des ailes augmentera de nouveau dans la proportion simple de la vitesse du vent; c'est-à-dire que, la charge continuant d'être la même, le nombre de tours dans un temps donné sera comme le carré de la vitesse du vent, et l'effet produit, étant dans ce cas proportionnel au nombre des révolutions des ailes, sera aussi comme le carré de la vitesse du vent; mais ceci ne doit s'entendre que pour les premiers accroissemens de cette vitesse.

En second lieu, comme les ailes n'acquerraient jamais au delà d'une vitesse donnée, relativement à celle du vent, bien que le poids fût réduit à zéro, il s'ensuit que, la charge continuant d'être la même, plus la vitesse du vent augmente, plus, malgré son augmentation progressive, l'effet produit s'écartera d'être proportionnel au carré de cette vitesse; de sorte que, la vitesse du vent étant supposée double, les effets, au lieu d'augmenter dans le rapport de 1 à 4, c'est-à-dire dans le rapport

des carrés des vitesses, se trouvent de 10 à 27 $\frac{1}{2}$ comme l'expérience le prouve.

Aussi, la charge continuant d'être la même perd de plus en plus de son influence, relativement à la puissance du vent, à mesure qu'il acquiert plus de vitesse ; de manière que le nombre de tours des ailes approche de plus en plus de coïncider avec le nombre de tours des ailes non chargées, ou, si l'on veut, approche de plus en plus d'être en rapport direct avec la vitesse du vent.

Lorsque la vitesse du vent est double, le nombre de révolutions des ailes chargées au *maximum* sera double aussi ; mais si les ailes ne sont pas chargées, le nombre de leurs révolutions ne sera pas plus que triple. Le produit ne croîtra donc pas au delà du rapport de 10 à 30, au lieu de 10 à 27 $\frac{1}{2}$, et cela en supposant même que les ailes n'aient pas été retardées, en élevant le *maximum* de charge par une vitesse sous-double.

On voit par-là que, quand la vitesse du vent excède le double de celle avec laquelle une charge constante produit un *maximum*, l'accroissement d'effet qui suit l'accroissement de la vitesse des ailes sera à très-peu près proportionnel à la vitesse du vent, et enfin précisément dans ce rapport.

On voit aussi qu'une charge invariable ne convient point à l'économie de ce moteur, et que sous ce rapport il ne faut l'appliquer qu'à des travaux dont on peut augmenter la résistance avec les accroissemens de vitesse qu'il prend. Nous avons vu dans les expériences de Coulomb que, lorsque la vitesse du vent augmentait, on mettait un peu plus de pilons.

Si, dans l'exemple que nous examinons, nous supposons maintenant que la charge augmente comme elle doit le faire avec la vitesse du vent, nous nous rappellerons que cette charge

doit être un peu moins que proportionnelle au carré de la vitesse du vent. Dans quels rapports les effets des mêmes ailes au *maximum* d'effet seront-ils donc lorsque la vitesse augmente? Nous avons vu que la vitesse des ailes au *maximum* d'effet était à peu près proportionnelle à la vitesse du vent, et que le *maximum* de charge était à peu près comme le carré de la même vitesse. Or, si ces deux rapports étaient exacts, il s'ensuivrait que l'effet du moulin, effet qui est le produit de la vitesse des ailes par le poids dont elles sont chargées, serait en raison triplée ou proportionnel au cube de la vitesse du vent.

L'expérience a montré que ces effets étaient moindres de $\frac{1}{30}$ que le cube de cette vitesse; donc on peut dire que les effets des mêmes ailes, lorsqu'elles produisent le *maximum* d'effet, sont à $\frac{1}{30}$ près proportionnel au cube de la vitesse du vent.

Nous venons de voir comment avec le petit moulin dont nous connaissons l'effet, sous une charge et une vitesse de vent données, il faut s'y prendre lorsque la vitesse et la charge viennent à varier. Il s'agit à présent de savoir comment évaluer l'effet dont il serait capable si le rayon des ailes venait à augmenter en longueur, la largeur restant la même, et sous la même vitesse de vent.

Il est évident que la vitesse de l'aile au *maximum* sera toujours dans un rapport donné avec la vitesse du vent; par conséquent, quel que soit le rayon ou même la longueur de l'aile, la vitesse absolue de son extrémité sera la même; ce qui aura lieu pour les autres points pris à des distances proportionnelles de l'axe de rotation; d'où il suit que les extrémités de toutes les ailes semblables, poussées par le même vent, auront la même vitesse absolue, et par conséquent emploieront pour achever leur révolution un espace de temps proportionnel à leur longueur, c'est-à-dire que le nombre de révolutions en un temps

donné, des ailes du moulin dont le rayon est augmenté, sera réciproquement proportionnel à leur longueur.

Donc, si le rayon est augmenté sans que la quantité de voilure le soit, la puissance du moulin ne sera pas augmentée, parce que ce qui est gagné par l'excès de longueur du levier (voyez ce sujet au IIe. livre) est perdu par la diminution de sa vitesse de rotation.

Mais si la voilure augmente en longueur comme le rayon, la largeur restant la même, l'effet mécanique que le moulin produira sous le même vent, croîtra comme le rayon.

Enfin, si la voilure augmente en longueur et en largeur avec le rayon, ce qui se fait toutefois en conservant les proportions dans les deux dimensions de la voilure, ainsi que la forme et la position des ailes, conformément aux usages adoptés dans les bonnes constructions, on trouvera, 1°. que la charge au *maximum* d'effet que les ailes ainsi augmentées sont capables de supporter, sera comme le cube du rayon, et 2°. que l'effet mécanique produit sera proportionnel au carré du rayon.

Le raisonnement est d'accord avec l'expérience sur ces deux points : en effet, on sait par la géométrie que, dans les figures semblables, les surfaces sont comme les carrés des côtés homologues; la quantité de voilure sera par conséquent comme le carré du rayon. De même, la forme et la position des ailes étant supposées semblables, l'impulsion du vent sur chaque partie semblable de la voilure sera proportionnelle à la surface de cette section, et par conséquent l'impulsion sur la surface entière de la voilure sera proportionnelle à cette surface : mais comme la distance de chaque portion semblable au centre de mouvement est proportionnelle au rayon, la distance du centre d'application à ce centre sera aussi proportionnelle à ce rayon, c'est-à-dire que le *levier*, à l'extrémité duquel la puissance

agit sera comme le rayon; donc l'impulsion du vent, eu égard à la surface de la voilure sur laquelle elle est exercée, est proportionnelle au carré du rayon, et eu égard au *bras de levier* à l'extrémité duquel elle est appliquée, elle est proportionnelle au rayon simple, d'où il suit que la charge au *maximum* des ailes agrandies, comme nous l'avons supposé, est comme le cube du rayon.

En second lieu, nous avons vu plus haut que le nombre des révolutions faites dans un temps donné est en raison inverse du rayon, et l'on sait que la longueur du *levier*, à l'extrémité duquel la puissance agit, lui est directement proportionnelle; ces rapports égaux et opposés se détruisent donc l'un l'autre; mais, dans les figures semblables, les quantités de voilure étant comme le carré du rayon, et l'action du vent proportionnelle à cette quantité de voilure, il s'ensuit que l'effet est comme le carré du rayon.

Les données expérimentales et les conséquences déduites d'une foule d'observations que nous venons d'exposer suffisent pour évaluer, d'une manière suffisamment approchée, la force d'un moulin à vent construit d'après les principes généralement adoptés par les bons constructeurs, ou, comme on le dit vulgairement, construit *à la hollandaise*, quelles que soient et sa grandeur et la vitesse du vent.

Nous nous sommes bornés à indiquer la marche à suivre dans ces évaluations, qui sont trop faciles pour nous y arrêter plus long-tems. Nous remarquerons cependant, pour terminer ce que nous avons à dire sur les moulins verticaux, que lorsqu'il s'agit d'un petit moulin, il convient de se servir, comme point de départ, des nombres fournis par le moulin-modèle de Smeaton; et pour les grands, de ceux que Coulomb a donnés d'après ses expériences sur les moulins de Flandre. Les règles

que nous avons données d'après les recherches de Smeaton serviront ensuite à estimer l'influence des changemens de dimensions que pourraient offrir le moulin que l'on veut calculer, ainsi que celle qui est exercée par les diverses variations dans la vitesse du vent.

Les moulins verticaux, dont nous venons de parler, ont besoin, pour exercer leur puissance, d'être directement en prise au vent, ou, comme on le dit, *orientés*; ils doivent donc être construits de manière qu'on puisse faire tourner le moulin sur lui-même, et présenter ses ailes au vent de quelque point qu'il souffle. Le conducteur du moulin est ordinairement chargé de ce soin.

Quelquefois cependant le moulin est composé de telle façon qu'il peut s'orienter de lui-même; il est alors un peu plus compliqué. Nous ne déciderons pas si ce dernier procédé est préférable à l'autre; il nous semble que la peine que prend le conducteur pour orienter son moulin n'est pas assez grande pour être rachetée par une construction plus dispendieuse et plus sujette à réparation. (*Voyez dans l'atlas différens exemples de moulins verticaux et divers modes de les orienter.*)

Des moulins à vent horizontaux.

Nous avons peu de choses à dire sur les moulins à vent horizontaux. On en a proposé de bien des espèces, et aucune n'a été spécialement adoptée.

En général, où le vent sert de moteur, c'est sur des ailes verticales qu'il agit; il y a peu de recherches utiles à faire sur ce sujet si l'on considère cette espèce de moulin en elle-même.

Le moulin à vent horizontal offre à la vérité, l'avantage de tourner à tout vent, sans avoir besoin d'être orienté; mais, ainsi que Smeaton l'a remarqué avec beaucoup de raison, il a le désa-

vantage de ne présenter à l'action du vent qu'un peu plus d'une voile ; tandis que dans les moulins à vent ordinaires, le vent agit contre les quatre ailes en même temps ; et si l'on supposait que chaque aile d'un moulin à vent horizontal eût les mêmes dimensions que chacune des ailes d'un moulin à vent vertical, il est évident que la puissance de ce dernier serait près de quatre fois plus grande que celle d'un moulin horizontal.

Ce désavantage résulte de la nature même des choses ; et si nous en considérons un plus éloigné, celui qui provient de la difficulté qu'éprouvent les ailes postérieures à se mouvoir contre le vent, nous ne serions point surpris de trouver que la puissance de cette espèce de moulin n'est réellement que *la* 8ᵉ. ou *la* 10ᵉ. *partie* de la puissance des moulins ordinaires ; ce dont on s'est assuré, dit Smeaton, par quelques tentatives qui ont été faites sur cet objet. (*Voyez l'atlas sur ce genre de moulin.*)

Ce que nous avons dit, en commençant, sur la grande irrégularité et même sur la violence d'action de ce moteur, nous amène à faire observer, en terminant, qu'on a besoin quelquefois de la modérer, non-seulement pour avoir moins d'irrégularité, mais encore pour empêcher que le moulin ne soit endommagé ou renversé. Pour cela, le moyen le plus usité est de *déshabiller* les ailes plus ou moins en repliant la voilure. On se sert aussi quelquefois d'un frein qui vient serrer fortement l'axe de rotation, et diminuer par conséquent la vitesse du mouvement dans le cas où l'on ne peut pas augmenter à volonté la résistance du travail.

Enfin on verra dans l'atlas que le moulin peut être organisé de manière qu'il se déshabille de lui-même.

CHAPITRE XXXII.

De la vapeur comme force motrice, et des machines à vapeur. Notions générales et préliminaires sur la manière actuelle d'employer cette force.

Les moteurs inanimés, dont nous venons d'exposer les propriétés, ont une puissance indépendante de l'homme; elle existe dans la nature, qu'il s'en serve ou non; il la prend où elle se trouve et comme elle se trouve; il n'est le maître ni de l'augmenter au delà de ses limites naturelles, ni de la transporter indifféremment en tous lieux au gré de ses désirs; et quand il fait usage de cette puissance sur les lieux mêmes qu'elle semble avoir choisis et pour ainsi dire irrévocablement désignés, il ne peut, d'une manière absolue, se prémunir contre toutes les variations d'intensité qu'elle subit; il faut qu'il y cède plus ou moins. Ce n'est donc pas la puissance qu'il proportionne au travail, c'est en général le travail qu'il est forcé de proportionner à la puissance. Son activité, son industrie lui offriraient en vain des débouchés pour une plus grande masse de produits; les limites dans lesquelles la force de ces moteurs est disponible, l'obligent à s'y renfermer et à restreindre son travail. Les localités où la force se trouve seraient défavorables, qu'il faut, ou renoncer à cette force, ou s'en servir avec tous les inconvéniens locaux qui l'entourent.

La puissance motrice de l'eau réduite en vapeur par l'action du feu va se présenter à notre examen avec des caractères

qui la distinguent éminemment des moteurs dont nous venons de parler.

Si ce n'est pas toujours et dans tous les lieux que la puissance de la vapeur est le moteur le plus économique, son service du moins est le plus avantageux sous tous les autres rapports. Et qui sait si par des progrès nouveaux, par des améliorations nouvelles dans la manière de produire et d'employer cette puissance, on ne diminuera pas sensiblement le seul désavantage qu'on lui trouve, la cherté relative de son emploi en la comparant, par exemple, au service de l'eau courante?

Cette force que l'homme crée, s'il est permis de parler ainsi, partout où il y a du combustible et de l'eau, serait alors le moteur par excellence, le moteur qu'il faudrait en général préférer à tous les autres, l'agent universel des grandes opérations mécaniques de l'industrie.

L'homme crée cette force, avons-nous dit, et il en soumet la puissance à toutes ses vues; il en étend ou il en resserre les limites à son gré : dans ses mains, c'est ou la force d'un seul homme ou celle de mille chevaux attelés, infatigables, et dans toute l'ardeur du premier coup de collier. Qu'il la borne à ce premier degré, ou qu'il la porte jusqu'au second et plus loin encore, il en est également le maître : elle agit quand on veut et comme on le veut, sans interruption aucune ou avec intermittence, irrégulièrement ou avec régularité. D'une main on en développe toute l'activité, d'une main on la suspend, quelle que soit la puissance de son développement.

Ici les localités sont indifférentes, si ce n'est sous le rapport économique, parce que cette force n'est nulle part, ou plutôt parce qu'elle est partout où l'homme veut la faire naître.

Et graces à cette belle découverte de l'esprit humain, l'on

peut dire que ces immenses plaines désertes et tourbeuses, ces vastes forêts, ces mines profondes et inépuisables de charbon de terre offrent à l'industrie des millions d'agens infatigables, qui naîtront, quand elle voudra, pour ne jamais périr, et dispenseront l'espèce humaine de ces travaux pénibles qui l'épuisent, la dégradent et semblent la détourner de sa véritable destination.

Il est donc permis de considérer ce moteur comme celui qui offre aujourd'hui le plus de ressources à l'industrie, comme le plus propre à répondre à toutes les vues que le génie de la mécanique peut avoir, à toutes les combinaisons qu'il peut produire.

Mais ce moteur est aussi le plus difficile à établir, et depuis le *fait* de la vapeur qui chasse devant elle tout corps qui, s'opposant à sa force motrice, n'est pas mis en état de lui résister, jusqu'à l'établissement de ce qu'on appelle une machine à vapeur, dont le mouvement dépend cependant de ce simple fait, l'intervalle est immense. Il s'est présenté de grandes et de nombreuses difficultés pour trouver et améliorer le mode d'appliquer cette force, qui ne peut se produire, en qualité de moteur, que dans des vases parfaitement fermés, et dont il faut se débarrasser après l'action, et lutter alors contre sa propre puissance, ou pour la chasser du lieu où elle vient d'agir, ou pour la détruire subitement et sans retour.

Aujourd'hui qu'on a trouvé quelques solutions dissemblables, sans être essentiellement différentes de ce problème difficile, en composant ce qu'on connaît sous le nom de machine à vapeur, on peut concevoir sans peine le jeu de ce mode d'application, quelque compliqué qu'il soit : il suffit pour cela de mettre sous les yeux la combinaison des pièces principales d'une machine à vapeur, et de montrer ce que fait et ce que devient la

vapeur entourée qu'elle est de cet ensemble de pièces sur lesquelles elle agit ou qui agissent sur elle par une suite de mouvemens combinés, tendant en commun à un but unique : la production du mouvement de *va et vient* rectiligne, ou celui de rotation continue.

Mais si l'on voit ainsi dans le jeu de cette machine les phénomènes divers qui donnent lieu au développement de l'un ou de l'autre de ces mouvemens moteurs, on ne les explique point encore; et si, par exemple, l'on venait à changer une des circonstances qui environnent l'action de la vapeur sur son mode d'application, on ne saurait pas ce qui pourrait résulter de ce changement, en un mot, on n'en a pas la théorie.

On dirait bien ce qui se passe dans une machine à vapeur; on imiterait bien la construction et l'assemblage des pièces au moyen desquelles on obtient, de la vapeur, un mouvement moteur applicable à un travail quelconque; mais de même qu'on agirait en aveugle, si l'on voulait améliorer le service de l'eau comme force motrice, sans connaître à fond les qualités mécaniques et la théorie de l'action de ce liquide, et si l'on bornait ses recherches au seul fait du mouvement de rotation que présente une roue hydraulique; de même, et à plus forte raison, n'aurait-on qu'une connaissance stérile de l'emploi de la vapeur comme puissance mécanique, et serait-on hors d'état d'en varier et d'en améliorer les modes d'application si l'on ne recherchait pas les causes des divers phénomènes que l'on remarque dans le mode actuel de mettre cette puissance en action, ainsi que les qualités propres des agens divers qui concourent ou peuvent concourir à rendre la vapeur une force, si on peut le dire, *travaillante*.

C'est dans les recherches les plus délicates et les plus modernes de la physique générale qu'il faut aller puiser des lu-

mières et sur ces phénomènes et sur les qualités de ces agens si difficiles à bien observer.

Ce serait donc par-là que nous commencerions l'étude de la puissance mécanique de la vapeur, si nous pouvions raisonnablement supposer que celui qui n'a pas la moindre connaissance des machines à vapeur telles qu'on les emploie aujourd'hui saurait où nous voulons en venir; mais les théories compliquées que nous exposerions comme préliminaires, lui paraitraient peut-être n'avoir aucun rapport avec le service industriel du moteur qui nous occupe en ce moment.

Et s'il lui arrivait de ne pas apercevoir le fil qui lie ces théories avec le moteur lui-même, il serait à craindre dès lors qu'il n'y donnât pas toute l'attention qu'elles méritent, et qu'il n'eût que des notions superficielles et bornées sur un des sujets les plus importans de la mécanique.

Pour appeler donc une attention égale sur tous les détails dans lesquels nous allons entrer, sur les faits si nombreux qui nous semblent se rattacher à l'usage qu'on fait ou qu'on peut faire de la vapeur comme puissance mécanique, nous croyons devoir montrer d'abord le jeu pur et simple des machines à vapeur, telles qu'elles auraient pu se présenter aux premières inspirations du génie de l'invention, ainsi que les phénomènes principaux sur lesquels ce jeu est fondé et que nous ne ferons qu'énoncer, nous réservant de les expliquer et de les évaluer plus loin.

Alors les questions sur l'origine de ces phénomènes, sur les circonstances qui peuvent influer sur eux, s'offriront d'elles-mêmes, et l'étude des faits qui, directement ou indirectement, pourront contribuer à jeter du jour sur ces questions, ne paraîtra plus nous éloigner de notre objet principal.

Il est temps d'entrer en matière.

Un fait qui peut avoir révélé la force motrice de la vapeur, c'est ce qui arrive lorsqu'on fait bouillir fortement de l'eau dans un vase dont le couvercle ferme assez exactement pour ne pas laisser échapper de vapeur, sans être néanmoins assujetti à ce vase de manière à résister à une certaine action de cette vapeur. Il vient un moment où celle-ci a pris assez de force pour faire sauter le couvercle; ce qui, dans notre supposition, ne manquerait pas d'avoir lieu au bout de quelques minutes de pleine ébullition sur un feu très-ardent.

Il n'est pas encore temps de dire que la vapeur peut prendre dans ce vase un tel degré de force expansive par la durée de l'action du feu sur le vase qui la contient, qu'on ne saurait déterminer avec une entière certitude quel degré de solidité il faudrait donner au vase et à sa fermeture, pour l'empêcher d'éclater ou de s'ouvrir avec une grande violence.

Ce fait au reste que tout le monde connaît, nous prouve que la vapeur produite par l'ébullition de l'eau, est douée de la faculté d'imprimer du mouvement à un corps qui s'oppose à son expansion sans avoir assez de force pour lui résister. C'est bien là assurément le principe d'un moteur, d'une puissance mécanique; il s'agit de savoir comment on peut en faire usage en cette qualité.

Supposons donc (*fig.* 3 *à la fin du volume*) le vase *a* rempli d'eau aux deux tiers ou aux trois quarts, bien hermétiquement fermé, mais communiquant par le petit tuyau *g* avec un cylindre creux *b*, bien alaisé et renfermant une portion de cylindre solide *e*, qui peut se mouvoir dans le cylindre creux, à la manière d'un piston.

Il est clair que cette espèce de piston s'opposera de tout son poids à la sortie de la vapeur que pourra produire le vase *a* lorsqu'on en portera l'eau à l'ébullition, parce que nous suppo-

sons que la vapeur ne peut fuir entre le piston et les parois du cylindre creux.

Quel que soit le poids du piston *e*, ce ne sera pas au moment où l'eau entre en ébullition qu'il se soulèvera; la vapeur, dans cet instant, n'a pas encore assez de force pour le faire monter; et remarquons d'abord que ce n'est pas ici le seul poids de ce piston qui s'oppose à l'expansion que la vapeur tend à prendre, mais aussi le poids d'une colonne d'air atmosphérique dont la base est égale à la surface du piston. Or pour que celui-ci cède à l'action de la vapeur, et se meuve de bas en haut dans le cylindre creux, il faut que cette vapeur ait assez de force pour vaincre non-seulement la pression qu'exerce sur elle le poids du piston, mais encore celui de toute la colonne atmosphérique dont on vient de parler.

Cependant au bout de quelque temps d'ébullition, le piston sera soulevé et porté de *c* en *d*; et si le cylindre creux *b* se prolongeait indéfiniment, le piston continuerait de s'élever tant qu'on entretiendrait l'eau du vase et le feu qui la réduit en vapeur. Il est impossible d'assigner à quel terme le piston s'arrêterait; il n'y en a point dans l'hypothèse que la vapeur continue d'affluer dans le cylindre indéfini et que le piston ne la laisse point s'échapper.

On est déjà frappé de l'aspect sous lequel se présente la force dont nous nous occupons, force qu'on peut développer sans limites assignables avec du feu et de l'eau qu'on entretient.

Supposons toutefois que le piston ne puisse pas dépasser le point *d*, qu'il y soit arrêté par un obstacle fixe quelconque : tout ce que nous avons obtenu de l'action de la vapeur est un mouvement instantané de bas en haut, qui ne peut plus se renouveler, tant que les choses restent dans cet état. Vous entretiendrez en vain le feu, vous ne produirez plus de mouvement. La vapeur continue bien d'agir sur le piston, mais il est arrêté par

l'obstacle, et tant que le cylindre et le vase qui enveloppent la vapeur seront assez solides pour résister à sa force expansive qui s'accroît graduellement, le repos existera. Vous n'avez donc pas obtenu un mouvement moteur dont vous puissiez tirer parti.

Il faudrait pour cela que le piston arrivé au haut de sa course, redescendît pour remonter encore et continuât cette manœuvre. Vous auriez alors un mouvement non interrompu, et fût-il même intermittent, et ne se répétât-il que par intervalles, on conçoit la possibilité de l'appliquer dans les deux cas à un certain travail industriel.

Voyons donc ce qu'il y aurait à faire à notre appareil pour produire ce mouvement alternatif du piston.

Il est évident que, si au moment où le piston est arrivé en *d*, nous pouvions faire échapper toute la vapeur qui est entrée dans le cylindre, sans y laisser aborder, pendant ce temps, de la vapeur nouvelle de la chaudière, il est évident, disons-nous, que le piston redescendrait par son propre poids, en poussant devant lui la vapeur qui ne le soutiendrait plus ou que très-faiblement. Un robinet *f*, par exemple, placé au bas du cylindre, et un autre *h*, placé sur le tuyau de communication *g*, pourraient produire cet effet : le robinet *f* serait fermé et le robinet *h* serait ouvert pour faire monter le piston. Lorsque celui-ci serait arrivé au point *d* on fermerait le robinet *h*, pour interrompre l'arrivée de nouvelle vapeur, et on ouvrirait le robinet *f*; alors la vapeur renfermée dans le cylindre trouverait par ce dernier robinet, une issue pour s'échapper dans l'air et le piston descendrait; il descendrait, parce que n'étant plus soutenu par la vapeur qui fuit, et étant d'ailleurs également pressé et par la colonne atmosphérique verticale, et par celle qui répond à l'ouverture du robinet, son propre poids l'entraînerait jusqu'en bas.

En refermant le robinet *f* et en ouvrant de nouveau le robinet *h*, le piston remonterait. Enfin on obtiendrait, par la répétition de cette manœuvre, le mouvement alternatif de bas en haut et de haut en bas, dont nous avons parlé.

Nous avons dit plus haut que, pour soulever notre piston, il fallait que la vapeur eût acquis plus de force qu'elle n'en a, au moment où l'eau arrive à l'ébullition; nous verrons, en son lieu, qu'à ce dernier point, la vapeur a tout juste la force nécessaire pour commencer à vaincre la pression de l'atmosphère qui s'exerce naturellement sur elle : or, dans notre appareil, il faut soulever et la colonne atmosphérique et le poids du piston; la vapeur doit donc avoir acquis plus de force qu'elle n'en avait au premier moment de l'ébullition, et elle en acquiert, lorsque, ne pouvant s'échapper de notre petite chaudière, elle continue de recevoir l'action d'un feu constamment entretenu.

Si le poids du piston est considérable, la force de la vapeur doit croître en proportion; ainsi, par exemple, si ce poids était équivalent au poids de la colonne atmosphérique qu'il faut soulever, la vapeur devrait être, par conséquent, un peu plus de deux fois aussi forte qu'elle l'est au moment de l'ébullition, pour commencer à soulever ce lourd piston. Tant que le diamètre de celui-ci reste le même, la colonne atmosphérique présente toujours la même résistance, dans quelques instans donnés; mais comme le poids du piston peut être plus ou moins grand, il est clair que les variations de ce poids détermineront celles de la force à laquelle la vapeur doit parvenir, pour le mouvoir.

Allons plus loin. La vitesse du mouvement ascensionnel du piston dépendra aussi de la grandeur de l'excédant de la force de la vapeur, sur les poids réunis du piston et de la colonne atmosphérique correspondant à la surface de ce piston. Si l'ex-

cédant est peu considérable, la vitesse sera petite; s'il est grand, le piston pourra monter avec rapidité.

Vous voyez donc que déjà vous êtes le maître de faire monter le piston avec plus ou moins de vitesse, il vous suffit pour cela d'entretenir un bon feu, et de laisser prendre à la vapeur une certaine force avant de la faire agir, c'est-à-dire avant de la mettre en communication avec le cylindre qui renferme le piston, en ouvrant le robinet *h*.

Il n'en est plus de même pour le faire descendre dans notre appareil. Ici vous n'en êtes pas le maître; s'il a monté avec quelque vitesse, il descendra plus lentement; encore faut-il qu'il ait assez de poids pour vaincre les frottemens qu'il éprouve nécessairement en glissant le long des parois intérieures du cylindre; et l'on peut dire que, quoi que vous fassiez avec l'appareil disposé et manœuvrant comme nous le supposons, le piston descendra toujours plus lentement que vous ne l'aurez fait monter.

La raison en est simple : si vous faites le piston lourd pour le mettre à même de vaincre plus efficacement les frottemens, vous aurez été obligé d'accroître la force de la vapeur proportionnellement à ce poids; or quand le piston est au haut de sa course il a sous lui une vapeur dont la force de pression est considérable; et bien que vous laissiez échapper cette vapeur par une petite issue, que vous venez de lui ouvrir, elle exerce toujours en sortant une certaine pression proportionnelle à celle qu'elle a primitivement développée, et comme vous n'avez pu accroître le poids du piston sans augmenter la force de la vapeur, vous ne retirerez guère d'autre avantage que de faire vaincre plus aisément la résistance des frottemens que le piston éprouve.

Vous n'obtenez donc avec cet appareil qu'un mouvement

irrégulier, c'est-à-dire une certaine vitesse en faisant monter le piston, et une vitesse plus petite en le faisant descendre.

Un autre inconvénient se présente encore. Puisque la vapeur, sans issue pour s'échapper, prend d'autant plus de force qu'elle reste plus long-temps exposée à l'action du feu, il en résulte qu'elle *peut*, dans notre appareil, accroître graduellement sa force et augmenter encore par-là l'irrégularité du mouvement alternatif du piston.

Et en effet, après le premier mouvement ascensionnel du piston la vapeur peut acquérir dans le temps que le piston met à descendre plus de force pour opérer le second mouvement qu'elle n'en avait pour le premier, ce qui augmente nécessairement encore la lenteur relative de chaque descente du piston. On ne sait donc où pourrait s'arrêter le développement de la force de la vapeur, et jusqu'à quel point d'irrégularité et même de désordre le mouvement produit pourrait être porté.

Or un mouvement moteur aussi irrégulier ne serait guère applicable, ou du moins il serait toujours fort incommode et exigerait des dispositions compliquées qui consommeraient une partie plus ou moins grande de la puissance.

Pour éviter cet inconvénient essayons d'un moyen qui le premier semble devoir se présenter à l'esprit : faisons monter et descendre le piston par l'action de la vapeur. Pour cela introduisons de la vapeur au-dessus du piston pour le faire descendre comme nous en introduisons dessous pour le faire monter. Vous concevez très-bien qu'il faut alors que le cylindre creux soit fermé hermétiquement par-dessus par un bon couvercle; et pour que le mouvement du piston soit transmis au dehors, adaptons à ce récipient une tige qui traverse le couvercle en passant dans une espèce de boîte qu'on remplit d'étoupes graissées afin que la tige y glisse à frottement doux sans laisser

d'issue à la vapeur par ce point. La figure 4 représente cette nouvelle disposition.

Rappelons-nous qu'il nous a fallu deux robinets pour faire agir la vapeur par-dessous, savoir : un robinet pour l'introduction de la vapeur et un autre pour la laisser échapper. Dans notre nouvelle disposition nous en employons quatre, car nous avons à faire produire à la vapeur un double effet.

Maintenant l'appareil étant disposé comme on le voit fig. 4, et tous les robinets fermés, lorsque l'eau sera en ébullition complète depuis quelque temps, ouvrez le robinet 1, le piston s'élèvera jusqu'à un certain point dans le cylindre, mais il ne pourra arriver jusqu'au couvercle *mm* que lorsque vous aurez ouvert le robinet 3; attendu que l'air, renfermé dans le cylindre au-dessus du piston ne trouvant pas d'issue pour s'échapper, se comprimera bien jusqu'à un certain point, mais lorsqu'il aura acquis le degré de tension ou de ressort que la vapeur possède elle-même, il lui fera équilibre ; en ouvrant le robinet 3 avec le robinet 1, l'air fuira donc devant le piston et n'opposera plus d'autre résistance que celle qui résulte de son passage rapide par une ouverture petite en comparaison du diamètre du cylindre qui en est en ce moment le réservoir.

Ainsi par suite de l'ouverture simultanée de ces deux robinets le piston monte. Aussitôt qu'il est parvenu au haut de sa course, fermez ces deux robinets, et ouvrez les robinets 2 et 4. Par le numéro 2 la vapeur viendra, par le point *d*, agir sur le dessus du piston, et par le numéro 4 vous donnez issue à la vapeur qui a fait monter le piston. Celui-ci descendra donc en vertu de la même force que celle qui l'a fait monter ; et, en répétant cette manœuvre, vous obtenez le mouvement de va-et-vient vertical de la tige ; c'est-à-dire qu'en mettant les deux mains sur les robinets 1 et 3 et en les ouvrant simultanément, vous faites mon-

ter le piston et sa tige; et, en ouvrant de même ensemble les robinets 2 et 4, vous faites redescendre le piston.

Ce mouvement de la tige est le *mouvement-moteur*, et l'on conçoit qu'il est possible d'en tirer parti pour l'exécution d'un travail approprié à la force qu'on obtient de cette manière.

On conçoit encore que par cette nouvelle disposition, on a remédié à l'irrégularité de mouvement que nous présentait l'autre appareil.

La régularité de mouvement que nous pourrons obtenir avec celui-ci dépendra : 1°. du maintien de la force de la vapeur au même degré d'intensité, et alors son action alternative dessous et dessus le piston sera toujours égale; 2°. de l'exactitude avec laquelle on ouvrira, aux instans convenables, chaque paire de robinets; 3°. enfin du soin qu'on aura d'entretenir l'eau et le feu comme il convient de le faire.

Pour ce qui regarde la conservation de la force de la vapeur au même degré d'intensité, dans le service qu'on lui fait faire dans notre appareil, il peut arriver de trois choses l'une : ou la force de la vapeur s'affaiblit après un certain nombre d'actions successive sur le piston; ou elle se maintient constamment au même degré de force; ou enfin elle s'accroît progressivement.

Examinons chacun de ces cas en particulier. La force de la vapeur s'affaiblit par deux causes : ou bien parce que le feu n'est pas entretenu au même degré d'ardeur; ce à quoi il est fort aisé de remédier, en l'alimentant de combustible et en le poussant avec une activité aussi également soutenue qu'il est possible; ou bien la vitesse des mouvemens de bas en haut et de haut en bas qu'a pris le piston, dans les premiers temps de l'action, est telle que la vapeur qui se forme dans la chaudière, pendant la durée de ce mouvement alternatif, n'est pas suffi-

sante pour remplacer incontinent celle qui vient d'agir, et pour agir comme elle avec la même puissance.

Nous dirons ici, en passant (car nous reviendrons plus tard sur ce sujet important), que lorsqu'une quantité de vapeur sort de la chaudière avec le degré de force nécessaire pour soulever le piston de notre appareil, elle semble enlever une partie de la force, une partie du ressort de celle qui reste dans la chaudière; il faut donc, pour continuer le mouvement avec la même activité, que la vapeur restante puisse reprendre assez vite, par l'action du feu, la force, le ressort qui lui sont nécessaires, et qui lui ont été enlevés, par la première émission de vapeur.

Or, dans le cas supposé, la vapeur s'affaiblit, non parce que le feu n'est point aussi ardent qu'il peut l'être mais parce que la chaudière ne fournit pas, à proportion de la consommation, d'une vapeur, portée au degré de force dont on a besoin, parce que la vapeur restante après une ou plusieurs émissions ne peut reprendre assez vite la portion de force qui lui a été soustraite, comme nous venons de le dire.

Qu'arrive-t-il alors? le mouvement alternatif du piston décroît insensiblement, et la machine finit par s'arrêter. Elle s'arrête, parce que la force de la vapeur, allant toujours en diminuant, atteint assez promptement le point où elle ne peut plus vaincre les résistances qui lui sont opposées.

Mais qu'est devenue la force produite, dira-t-on, et puisque le feu et l'eau, élémens de cette force, sont encore en présence, que devient la force qui en résulte, l'appareil étant en repos? d'abord, une partie de la force produite s'est consommée en mettant le piston en mouvement, et l'autre partie s'est échappée en pure perte par les robinets de décharge 3 et 4; car la vapeur après l'action avait encore beaucoup de force.

Ensuite, quant à la force qui résulte de la continuation de l'action du feu sur l'eau de la chaudière, force qui, pour n'être plus suffisante pour mouvoir notre piston, n'en existe pas moins, elle se rétablit, elle se répare, et au bout d'un certain temps, elle peut redevenir capable de produire les mêmes effets mécaniques; mais, comme précédemment, elle ne peut les continuer sans interruption.

Vous voyez donc que, dans ce cas, pour obtenir un mouvement continu, il faudra, ou diminuer la résistance, et par conséquent, la quantité de vapeur nécessaire pour la vaincre, jusqu'à ce que cette quantité produite par la chaudière, et pouvant toujours affluer avec la même force, soit suffisante pour entretenir régulièrement le mouvement. Vous pouvez diminuer alors, autant que l'expérience vous l'indiquera, le diamètre du piston et la capacité du cylindre, de telle manière que la capacité de la chaudière soit très-grande en comparaison de celle du cylindre.

Ou bien, si vous ne diminuez pas la résistance, il faudra augmenter convenablement la capacité de la chaudière, et conserver les dimensions du cylindre.

Vous n'auriez, dans notre supposition, aucun changement à faire, si un mouvement intermittent, se répétant par intervalles, pouvait convenir à vos vues; car aussitôt que vous apercevriez que la force commence à faiblir, vous fermeriez le robinet *i* d'admission, et laisseriez reprendre à la vapeur la force qu'elle devrait avoir, pour agir de nouveau.

Le second cas dont nous avons parlé plus haut, celui où la vapeur agit, sans interruption, avec la même force, arrive, lorsque la capacité de la chaudière est dans un tel rapport avec le diamètre du piston et la capacité du cylindre, et la force de la vapeur tellement proportionnée à la résistance, que, pen-

dant le temps que la portion introduite dessus ou dessous le piston agit, une portion semblable et de même puissance est produite dans la chaudière. La force n'a pas alors d'intermittence, parce qu'il y a dans la masse d'eau et de feu tous les matériaux, si l'on peut parler ainsi, qui constituent, qui créent, dans le temps toujours très-court que le piston met à monter ou à descendre, toute la force mécanique que ce mouvement exige.

On conçoit, d'après cette dernière considération, que lorsque le rapport des capacités et du cylindre et de la chaudière approche de celui qui doit exister, pour avoir un mouvement-moteur continu; on conçoit, disons-nous, que, dans le cas où la force viendrait à faiblir, on pourrait la ramener à l'état de force constante, en se bornant tout simplement à diminuer la résistance du travail dont elle ferait le service : car s'il faut un certain temps à la vapeur, dans un appareil de cette espèce, pour acquérir la force qui lui est nécessaire pour vaincre la première résistance à laquelle elle ne pouvait entièrement suffire, il est certain qu'en diminuant un peu la résistance, vous vous dispensez par cela même de porter la force de la vapeur au même degré d'intensité, et vous produisez en moins de temps la portion qui est nécessaire à chaque mouvement.

Supposons maintenant pour le troisième cas, qu'avec notre appareil, fig. 4, la vapeur produite ait trop de force, et que celle-ci s'accroisse progressivement. Ceci peut provenir principalement de ce que la charge est trop petite comparativement à la puissance mécanique de la vapeur développée dans le temps le plus court que le piston puisse mettre à monter ou à descendre; en d'autres termes, de ce que la chaudière est trop grande relativement, et le feu trop fort; ou bien de ce que le feu est poussé avec trop d'activité sous une chaudière de dimensions convenables.

Il est clair que puisque vous produisez dans un temps plus de force que vous n'en consommez dans le même temps, cette force doit nécessairement s'accumuler et s'accroître progressivement. Elle agit donc chaque fois avec plus de violence, et le mouvement du piston s'accélère outre mesure; vous n'avez plus le temps d'ouvrir les robinets; le désordre se mettra dans la manœuvre de l'appareil, et le mouvement-moteur passera de l'irrégularité à un entier anéantissement, par les actions tumultueuses et opposées des quantités de vapeur introduites dessus et dessous le piston. Alors non-seulement le piston vient frapper violemment, et peut briser le couvercle et le fond du cylindre dans son mouvement alternatif, mais vous courez encore le danger de voir crever ou éclater la chaudière, tant la force de la vapeur peut s'accroître.

Il s'agit de remédier à ces graves inconvéniens. Ne nous arrêtons pas à la possibilité trop évidente, trop facile à saisir, d'augmenter la résistance, si la nature du travail peut s'y prêter, ou de diminuer la capacité de la chaudière et la masse du feu; supposons que la résistance soit constante, et qu'il soit question seulement de prévenir l'irrégularité de mouvement, et le danger, auxquels pourrait donner lieu l'incurie de celui qui serait chargé d'entretenir le feu, et qui, le poussant outre mesure, donnerait à la vapeur l'accroissement de force dont nous parlons.

S'il était attentif, il pourrait en général s'apercevoir de cet accroissement de force par l'accélération de mouvement que prendrait le piston, et y remédier en ralentissant l'action du feu; mais qui oserait répondre de cette attention dans un travail soutenu? Il peut se faire d'ailleurs que, par quelques accidens, par quelques circonstances éventuelles, le piston ne montre pas d'accélération, par quelques obstacles dans le cy-

lindre ou dans le tuyau de communication de la chaudière au cylindre; comment se fier à une force ainsi emprisonnée, et qui par cela même gagne rapidement une telle intensité de puissance, qu'elle peut forcer ses enveloppes et lancer au loin ce qui l'entoure? Un moyen fort simple s'est présenté d'abord pour éviter ce danger.

On a imaginé de placer une soupape x qui s'ouvre de dedans en dehors, et qui est assez lourde pour ne s'ouvrir que lorsque la vapeur prend un accroissement de force qui pourrait nuire; dans ce cas la vapeur trouvant une issue s'échappe dans l'air, sa force décroît incontinent, et la soupape se referme par son propre poids aussitôt que la vapeur n'a plus assez de puissance pour la soulever. La fonction de cette soupape lui a fait donner le nom de *soupape de sûreté*. Il est inutile de dire que nous reviendrons sur cet objet ainsi que sur ce qui précède, si l'on veut bien se rappeler que nous nous bornons, pour le moment, à montrer les phénomènes que présente l'action motrice de la vapeur dans l'ordre qui nous paraît le plus convenable pour les bien saisir, et à donner un premier aperçu des moyens qu'on peut employer pour développer et diriger l'action de ce moteur. Nous suivons la route qui semblerait être la plus courte et la plus naturelle pour créer les machines à vapeur si elles n'existaient pas.

Mais revenons à notre sujet. Vous venez de voir quels moyens on peut employer pour conserver à la vapeur le degré de force constante qui convient au mouvement alternatif du piston ainsi que pour faire échapper la vapeur lorsqu'elle vient à dépasser une certaine limite de force par le défaut de soin de celui qui entretient le feu ou par quelque autre cause accidentelle.

Ces moyens ne suffiraient pas pour être assuré de la régu-

larité du mouvement-moteur, il faut encore que les robinets s'ouvrent exactement dans un temps déterminé, et chaque paire comme il convient pour produire soit l'élévation, soit la descente du piston; il faut, par exemple, que le robinet 1 d'introduction de la vapeur et le robinet 3 de décharge s'ouvrent exactement dans le même temps pour la montée du piston, et les robinets 2 et 4 pour la descente.

Si nous examinons de près la manœuvre des robinets de notre appareil, fig. 4, manœuvre dont dépend en dernier ressort la régularité du mouvement-moteur, nous devrons convenir qu'elle est très-incommode, très-assujettissante, et que la moindre distraction qui s'emparerait de l'homme chargé de cette manœuvre pourrait jeter le trouble dans l'action du moteur.

Cet appareil est donc très-imparfait sous ce rapport; et avec quatre robinets qu'on ouvre et qu'on ferme à la main, pour régler le mouvement, nous sommes encore peu avancés dans les dispositions propres à rendre facile et sûr l'usage de la vapeur comme force motrice.

Cherchons de plus heureuses dispositions. D'abord il ne nous est pas difficile de concevoir qu'on peut produire avec deux robinets les mêmes effets qu'avec quatre, savoir : avec un robinet qui, suivant qu'on le tournera dans un sens ou en sens opposé, laissera passer la vapeur dessous ou dessus le piston; et avec un autre robinet de la même espèce on ouvrira une décharge à la vapeur, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du piston.

Le robinet 1 (fig. 5), est destiné à faire agir la vapeur tantôt dessus, tantôt dessous le piston, et le robinet 2 à vider la vapeur après chaque action à la partie supérieure comme à la partie inférieure du cylindre.

Le cylindre *b* est immédiatement attaché sur la chaudière,

et le tuyau de communication est porté en *g*, et rejoint ce tuyau distributeur *o* à l'endroit où le robinet 1 est placé.

La manœuvre sera un peu plus facile sans doute, mais il faut encore ouvrir deux robinets à la main et simultanément; c'est encore un assujettissement très-incommode, et la régularité du mouvement-moteur n'est guère plus assurée avec cette disposition qu'avec l'autre.

Si nous allons plus avant dans l'observation des effets que nous avons à produire pour favoriser l'action de la vapeur sur le piston qui, comme on sait, est le point d'application de notre moteur, nous remarquerons qu'en introduisant la vapeur sous le piston, il faut en même temps lui ouvrir une issue par en haut, et qu'en l'introduisant dessus, il faut au même moment la faire échapper par en bas. L'on peut concevoir d'après cela la possibilité de produire ces deux effets avec un seul robinet au lieu de quatre, ce qui réduirait la manœuvre régulatrice de l'appareil à un seul mouvement, au lieu de quatre ou de deux comme ci-dessus.

En effet, si l'on entaille un robinet sur deux portions opposées de sa surface cylindrique ou conique, comme on en voit la coupe fig. *b* en *m* et en *n*, il est clair qu'en tournant ce robinet par le levier *l*, tantôt dans un sens, tantôt en sens opposé, nous produirons les effets que nous cherchons : on voit par la position du robinet en *m* que la vapeur de la chaudière est en communication avec le dessus du piston, et qu'en même temps le dessous est ouvert en *o* pour en laisser échapper la vapeur; que par la seconde position du robinet en *n* l'on met la vapeur de la chaudière en communication avec le dessous du piston, et qu'on ouvre en même temps une issue à la vapeur qui est dessus.

Voilà donc nos quatre robinets réduits à un seul, nos quatre

mouvemens ramenés à un seul mouvement. La manœuvre est devenue bien plus facile, et, au moyen du levier *l* qu'on peut allonger à son gré, l'homme n'est plus autant incommodé de la chaleur du fourneau, au-dessus duquel nous l'avons toujours supposé placé dans nos appareils. Mais nous avons encore un homme pour régulateur immédiat, et rien ne nous met à l'abri de ses distractions dans un service qui, comme celui-ci, exige absolument une attention soutenue et une activité dont on ne peut se relâcher un seul moment sans troubler l'action du moteur.

Poursuivons donc nos recherches, et voyons s'il ne serait pas possible de faire mouvoir le robinet par la machine même, c'est-à-dire d'en régler le mouvement par le mouvement de la machine.

CHAPITRE XXXIII.

Continuation du même sujet.

La fig. 6, nous montre que, lorsque le robinet a pris la position *m*, la vapeur de la chaudière vient agir *sur* le piston, et la vapeur, qui a servi et qui se trouve *dessous* peut s'échapper par l'ouverture *o*; or, remarquez bien que c'est précisément dans le moment où le robinet doit prendre cette position, que la tige du piston est à son plus haut point d'élévation; il s'ensuit donc que si vous établissiez une certaine liaison entre le point où l'extrémité de la tige parvient, lorsque le piston est près d'arriver au haut de sa course, et l'extrémité *l* du levier

du robinet; si par exemple, vous attachiez une corde, une courroie, une tringle de métal, à l'extrémité de la tige du piston et à celle du levier dont le robinet est armé, de telle façon que la tige, parvenue au plus haut point d'élévation, fît prendre au robinet la position *m*, le piston redescendrait. Maintenant si, lorsqu'il est descendu, la même disposition, entre le sommet de la tige et le levier, fait prendre au robinet la seconde position *n*, la vapeur agira par-dessous, et le piston remontera et reproduira, par sa tige, la première position du robinet.

La fig. 7 donne une première idée de ce qu'on peut faire pour mouvoir le robinet avec précision, par le mouvement de la machine; il y a bien d'autres moyens dont il sera question plus loin. Nous voyons déjà du moins que le mode de régler la machine par elle-même est infiniment préférable au premier que nous avons employé, et comme le robinet ne doit passer de la position *m* à la position *n*, et de la position *n* à la position *m* que quand le piston et le sommet de sa tige sont parvenus aux deux limites de leur course commune, il est clair que la machine allant vite ou lentement, le robinet ne peut prendre de mouvement que quand il le faut et comme il le faut. La vapeur de ce côté-là ne peut donc être troublée dans son action.

Voilà donc le mouvement de la machine qui se règle de lui-même, et les inconvéniens attachés à un concours étranger, pour la manœuvre du robinet, entièrement évités; voilà un nouveau progrès dans la recherche des moyens de tirer parti de la vapeur, comme force motrice.

Ce n'est pas tout : nous avons parlé plus haut de la nécessité de bien gouverner le feu, pour obtenir un mouvement-moteur régulier; mais, quelque soin qu'on y apporte, il est matériellement presqu'impossible de lui donner et de lui conserver tou-

jours le même degré d'intensité. Le mouvement-moteur devrait donc suivre ces variations du feu et n'offrir jamais cette action précise, ce jeu régulier, si nécessaires en général aux travaux industriels. La soupape de sûreté, dont il a été question ci-dessus, laisse bien échapper de la vapeur, lorsque la force de celle-ci, sortant des limites qu'elle doit avoir, compromettrait l'appareil, le travail et les travailleurs; mais, indépendamment de cette grave circonstance, il y a encore celle où la force de la vapeur, sans s'accroître d'une manière inquiétante, et par conséquent sans soulever la soupape de sûreté, passe à divers degrés d'intensité, suivant que le feu est plus ou moins ardent. Si la soupape de sûreté était assez légère pour s'ouvrir pour de petits accroissemens de force, elle serait d'un usage fort incommode, par la vapeur qu'elle répandrait autour de l'appareil, et, ce qui est plus important, elle dépenserait inutilement beaucoup de force, par les pertes de vapeur; pertes qui pourraient se répéter à des intervalles très-rapprochés. Il faudrait donc trouver un moyen de prévenir ces irrégularités de force et de mouvement; il faudrait que, lorsque la force de la vapeur s'accroît assez pour imprimer au piston un mouvement plus rapide qu'on ne le veut, on pût empêcher la vapeur de sortir de la chaudière en aussi grande abondance; et que, lorsqu'elle faiblit, on la laissât sortir à plein tuyau; et le comble de la perfection serait de rétrécir ou d'élargir graduellement le passage de la vapeur dans le tuyau qui l'amène au cylindre, suivant les divers degrés d'accroissement ou de décroissement qu'elle prend par l'action variable du feu.

Quand un pareil problème se présente pour la première fois à l'esprit, il semble que la solution en est impossible par un moyen purement mécanique, et qu'il faut avoir recours à une personne attentive et intelligente, pour remplir la fonction de

graduer ainsi l'orifice par lequel la vapeur vient exercer son action dans le cylindre.

Cependant il y a un effet extérieur qui suit toujours immédiatement l'accroissement de force de la vapeur, c'est l'augmentation de vitesse dans le mouvement du piston; il y a un autre effet, dans le cas où cette force décroît, c'est la diminution de vitesse; ne pourrait-on pas, par quelques dispositions de pièces, lier ces deux effets avec un robinet, par exemple, placé sur le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière; de manière que lorsque la vitesse du piston augmenterait, ce robinet rétrécirait le passage de la vapeur, et qu'il rendrait ce passage entièrement libre, lorsque la vitesse viendrait à diminuer. Cette disposition a été trouvée; vous la voyez, fig. 7, réunie à celles dont nous avons parlé plus haut, et à une autre dont il va être question.

S'il faut entretenir le feu pour continuer le mouvement de notre moteur, il est clair qu'il faut aussi entretenir l'eau de la chaudière, puisqu'à chaque coup de piston une partie de l'eau qu'elle contient s'échappe en vapeur; mais si vous vouliez la renouveler par quelqu'endroit du couvercle de la chaudière par lequel l'introduction de l'eau aurait lieu, comme si vous remplissiez un vase ordinaire, vous perdriez beaucoup de vapeur, et le mouvement de la machine s'arrêterait nécessairement, et cela non-seulement jusqu'à ce que l'ouverture fût fermée, mais encore jusqu'à ce que la nouvelle eau introduite eût pris assez de chaleur pour produire de la vapeur au degré de force qu'exige le mouvement de votre piston.

Ce n'est pas la seule difficulté. Il n'est pas indifférent d'introduire dans la chaudière plus ou moins d'eau qu'il ne s'en consomme à chaque coup de piston : si vous en introduisez plus, la chaudière se remplira outre mesure, et vous porterez

de l'eau au lieu de vapeur dans le cylindre, ce qui arrêtera le mouvement de votre appareil. Si vous en introduisez moins, l'eau de la chaudière finira par s'épuiser et votre force aussi. C'est donc la quantité d'eau qui se consomme en vapeur que vous devez remplacer le plus exactement possible; non pas à des intervalles trop éloignés les uns des autres, car vous refroidiriez votre chaudière, par l'introduction d'une trop grande masse d'eau à la fois, mais petit à petit, au fur et à mesure que la consommation se fait : de cette manière vous n'influez pas sensiblement sur la force dont la constance dépend entièrement du maintien de l'eau au même degré de chaleur.

Vous comprenez parfaitement que, puisqu'il en est ainsi, il faut que vous fassiez des dispositions telles que l'eau alimentaire arrive successivement dans la chaudière par une ouverture qui lui livre passage, sans en laisser un à la vapeur.

Deux moyens se présentent pour parvenir à ce but : le premier consiste à élever, à un certain point au-dessus de la chaudière, un réservoir d'eau alimentaire, et de faire communiquer le réservoir avec la chaudière par un tuyau dont le diamètre soit tel que sa dépense d'eau en un temps donné soit aussi exactement que possible celle de vapeur que fait la chaudière dans le même temps. Par cette disposition, l'eau peut entrer dans la chaudière, par le tuyau bien soudé sur celle-ci, sans que la vapeur puisse en sortir; elle y entrera, si le réservoir est élevé assez haut, pour que la colonne d'eau qui en sort ait, par sa pression, la force de vaincre la résistance que la vapeur oppose à la sortie de cette eau. Le point, où le réservoir doit être placé, dépend donc de la force de la vapeur que vous emploierez; nous ne donnons ici qu'une idée de cet objet, nous reviendrons, quand il en sera temps, sur les modes d'évaluation et sur les diverses modifications qu'il comporte.

L'autre moyen consiste à envoyer de l'eau dans la chaudière par une petite pompe, dont les dimensions et le jeu sont établis de manière à ne fournir successivement que la quantité d'eau qui se consomme successivement en vapeur. Pour mouvoir cette petite pompe, on peut prendre directement ou indirectement la force nécessaire sur la tige du piston, comme la fig. 7 en donne un exemple; au reste, la manière de prendre cette force peut varier au gré des constructeurs.

Avec les dispositions que nous venons d'appliquer successivement à notre premier appareil, fig. 3, nous l'avons rendu propre à recueillir et à régulariser la force motrice de la vapeur, et nous nous sommes servis des moyens qui semblent venir les premiers à l'esprit, sans entrer dans l'examen des améliorations dont ils sont susceptibles et sur lesquelles nous avons à revenir.

La fig. 7 est comme le résumé de ces diverses dispositions; nous dirons d'abord que nous avons séparé la chaudière du corps de l'appareil, comme on le fait ordinairement, pour pouvoir donner à ce dernier une assiette solide et pour la commodité du service; et en outre que nous avons figuré une première transmission du mouvement de la tige en l'attachant à un balancier qui imprime à un volant le mouvement de rotation, afin de donner un premier aperçu *d'une espèce de machine à vapeur.*

Voyons maintenant sur cette fig. 7, le jeu de tout notre appareil.

a Chaudière.

bb Réservoir d'eau alimentaire, avec son tuyau de communication à la chaudière; il faut le supposer placé à une hauteur convenable.

b'b' Petite pompe alimentaire, ajoutée comme exemple, avec

son tuyau de communication, et pouvant se mouvoir, comme on le voit, avec le balancier *cc*. Il est superflu de dire que lorsqu'on se sert de cette pompe, le réservoir est inutile, ou lorsqu'on se sert du réservoir, la pompe est inutile.

Vous voyez le piston *d* arrivé au bas de sa course, et le robinet *e* en position de mettre la vapeur de la chaudière en action au-dessous du piston, et d'ouvrir en même temps l'issue *o* à la vapeur supposée au-dessus du piston, après le mouvement précédent, c'est-à-dire après qu'elle a fait descendre ce piston.

Le piston s'élève donc, et comme sa tige est convenablement attachée au balancier *cc*, celui-ci s'élève aussi à ce point et fait faire au volant *f* une demi-révolution.

Aussitôt que le piston est au haut de sa course, ou, si l'on veut, qu'il est remonté, la tige *g* est arrangée de manière avec le levier du robinet *e*, qu'elle lui fait prendre la seconde position (*Voyez* fig. 6); position d'après laquelle une nouvelle vapeur vient agir sur le piston, tandis que celle du mouvement précédent peut s'échapper en effet par l'issue *o*. Le piston redescend donc en entraînant encore avec lui le balancier, qui fait achever au volant sa révolution entière; de sorte que ce mouvement alternatif du piston fait tourner le volant dans le même sens et avec d'autant plus de vitesse que ce mouvement alternatif est lui-même plus rapide.

Vous voyez en outre sous la lettre *h* ce qu'on nomme le *modérateur*, c'est-à-dire cette disposition au moyen de laquelle on rétrécit le passage de la vapeur lorsque celle-ci imprime un mouvement trop rapide au piston : pour cet effet le modérateur tourne avec le volant par la corde *n* et agit sur un second robinet *m* par l'intermédiaire du levier *l*. Quand ce modérateur tourne trop vite, ce qui arrive quand le volant et par conséquent le piston ont un mouvement trop rapide, les deux boules

s'écartent et font baisser le levier *l* qui, à son tour, fait faire une petite portion de révolution au robinet *m*, et rétrécit ainsi le passage de la vapeur dans le tuyau qui communique de la chaudière au cylindre.

p est la soupape de sûreté.

Tel est le jeu de notre appareil avec les pièces et les détails que nous avons vu la nécessité de lui adapter successivement pour recevoir le mouvement produit par la force de la vapeur, et pour le transmettre à un travail quelconque avec régularité et sans interruption; transmission qui s'opère ici par l'intermédiaire du volant dont le mouvement de rotation peut s'appliquer à une opération mécanique quelconque.

Vous venez d'avoir sous les yeux une image imparfaite ou plutôt le squelette d'un certain genre de machine à vapeur, c'est-à-dire, d'un mode d'application de la force motrice de la vapeur, lequel est à cette force, ce qu'une roue hydraulique, ce qu'une machine à colonne d'eau sont à la force motrice de ce fluide, ce qu'un manége est à la force du cheval, ce qu'une manivelle est à la force de l'homme.

Nous nous contentons pour le moment de montrer le système compliqué de ce mode d'application; nous reviendrons plus loin sur les détails des dispositions principales pour qu'on comprenne parfaitement le jeu de chacune en particulier.

Cherchons maintenant à nous faire une idée des résistances naturelles que peut avoir à vaincre la force de la vapeur avec un mode d'application conçu dans le système dont nous venons de nous occuper.

Vous savez que l'air atmosphérique exerce sur tous les points du cylindre dans lequel le mouvement du piston a lieu, une pression équivalente, terme moyen, à une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur. Or il est évident que si le piston

étant au bas de sa course vous vouliez la lui faire parcourir jusqu'en haut en employant la force d'un homme, d'un cheval, en un mot une force quelconque, il est évident, disons-nous, que le *vide* s'établirait dans la capacité que le piston vient de parcourir, puisque, par la construction de notre appareil, il n'y a aucune communication ouverte entre le dehors et le dedans du cylindre; l'air ne peut donc pénétrer dans l'espace que le piston laisse libre en montant.

Rappelons-nous ce qui a été dit dans un des chapitres précédens sur la pression atmosphérique, et que pour faire le vide dont il est question il vous a fallu déployer une force capable de soulever une colonne d'air dont la base est égale à celle du piston, et dont le poids par conséquent équivaut à celui d'une colonne de mercure qui aurait pour base l'aire du piston et 76 centimètres de hauteur, et de soulever tout ce poids à une hauteur égale à la course du piston.

Rappelons-nous aussi que vous n'auriez pas cette pression à surmonter, si, lorsque vous soulevez le piston, l'air pouvait s'introduire dessous par quelque ouverture pratiquée au bas du cylindre; car alors la colonne atmosphérique qui viendrait agir sous le piston ferait équilibre à la pression de celle qui agit par-dessus. On fait très-aisément mouvoir le piston d'une seringue ouverte à ses deux extrémités; mais il n'en est plus de même lorsqu'on en ferme une hermétiquement; dans ce dernier cas, en tirant le piston, l'on fait le vide et l'on soulève toute la colonne d'air qui répond à la base du piston.

Si donc, pour faire monter le piston de notre appareil renfermé comme il l'est dans le cylindre, vous avez inévitablement cette résistance atmosphérique à vaincre; vous l'avez de même lorsque vous introduisez de la vapeur dessous pour le faire monter; il s'ensuit dès lors que cette vapeur doit avoir d'abord

le degré de force nécessaire pour vaincre cette résistance, sans quoi le piston resterait en repos lors même que sa tige ne porterait aucune charge, que la machine ne ferait aucun travail utile.

Cela étant, nous pouvons déjà dire en passant, 1°. que plus le diamètre du piston est grand, plus la force de vapeur au moyen de laquelle vous voulez le faire mouvoir doit être considérable, puisque le poids de la colonne atmosphérique augmente avec la grandeur de sa base; 2°. que cette force doit être d'autant plus considérable que vous donnez plus de course à votre piston en un certain temps, puisque vous devez porter dans ce temps la masse de la colonne atmosphérique à une plus grande hauteur.

Le premier effet mécanique que vous devez produire avec notre appareil est donc de soulever une colonne d'air d'une base égale à celle du piston chaque fois que celui-ci monte ou descend, et cela avec une vitesse égale à celle que le piston prend lui-même : si cette colonne d'air, immense par sa hauteur, prenait tout à coup une forme visible, vous la verriez suivre tous les mouvemens du piston comme un corps solide que vous auriez attaché à la tige.

Mais cet effet mécanique que vous devez préalablement et inévitablement produire ici n'est pas utile, et toute la force qu'il a exigée, qu'il a consommée, est entièrement et irrévocablement perdue pour le travail.

Cette force, que nous évaluerons plus loin, est considérable; pourtant en la dépensant vous n'avez encore rien fait pour l'opération mécanique à laquelle vous destinez le moteur. Il faut donc que vous donniez à votre vapeur non-seulement la force nécessaire pour imprimer à la colonne d'air qui correspond à la base du piston le même mouvement alternatif qu'à celui-ci, mais encore la force qu'exige le travail que vous avez à faire.

La présence de l'air toujours agissant, toujours en opposition au travail du moteur, est assurément une circonstance très-désavantageuse dans le mode d'application que nous examinons, elle présente même un inconvénient grave dont nous pouvons parler dès à présent.

Cet inconvénient naît de l'obligation où vous êtes de donner aux enveloppes qui doivent contenir la vapeur une solidité proportionnelle à la force à laquelle vous ne pouvez vous dispenser de porter cette vapeur, afin de vaincre cette double résistance et de l'air et du travail. Or, si la solidité de ces enveloppes n'était pas suffisante, ou que, par l'usage, elle vînt à s'altérer, l'appareil pourrait éclater sous l'effort de la vapeur.

La raison en est simple : la vapeur qui se développe dans la chaudière avec une certaine force, s'appuie, presse sur tous les points de cette chaudière, et chacun de ces points doit être assez solide pour résister invinciblement à la force que vous avez donnée à la vapeur et qui s'exerce sur lui ; s'il ne l'était pas, ou si par événement il ne l'était plus, le danger est imminent.

Bien qu'on puisse trouver dans les matériaux de construction assez de solidité pour contenir sans danger une vapeur portée à un degré de force considérable, il n'en est pas moins vrai cependant que pour imprimer du mouvement à l'air, mouvement, nous le répétons, entièrement inutile à l'effet industriel que vous vous proposez d'obtenir, vous êtes obligé de donner aux enveloppes, c'est-à-dire à la chaudière et au cylindre une épaisseur et une solidité *d'ajustage* qui ne seraient pas nécessaires au même point si vous n'aviez une masse énorme d'air à ébranler avec toute la vitesse de votre piston moteur.

Mais n'y aurait-il pas quelque moyen d'éviter cette perte de force? S'il fallait absolument imprimer du mouvement à l'air pour faire usage de la vapeur comme force motrice, ne pour-

rait-on pas tourner ce mouvement en faveur de l'effet utile au lieu de l'avoir en opposition? ou bien ne serait-il pas possible de se débarrasser entièrement de l'action de l'air, en supprimant toute corrélation entre le mouvement de notre piston et les colonnes d'air qui entourent une machine à vapeur? La solution de ces deux questions serait assurément fort importante.

Considérons d'abord que la force de la vapeur, poussant devant elle tout corps qui n'a pas assez de puissance pour s'opposer à son action motrice, est le seul fait sur lequel nous ayons fondé l'emploi de cette force, et il est le seul en effet dont nous ayons eu besoin. Or, pour chercher avec quelque espoir de succès la solution des deux questions ci-dessus, il faut que la vapeur nous présente quelque autre fait, quelque autre propriété essentielle que nous puissions mettre en jeu, pour changer le mode d'action dont nous nous sommes servis plus haut, ou du moins les circonstances de cette action.

Essayons de la propriété suivante de la vapeur : on sait que de la vapeur produite par de l'eau en ébullition, qu'on introduit dans une capacité, un tuyau, un cylindre, en un mot dans un vase quelconque, en chasse l'air et prend sa place si l'on a ménagé à celui-ci une issue pour s'échapper; et si nous supposons qu'au moment où l'air est entièrement sorti de la capacité, on ferme brusquement l'ouverture pour ne plus lui permettre de rentrer, on sait encore qu'en introduisant un peu d'eau froide dans cette capacité pleine de vapeur, celle-ci repassera à l'état liquide, occupera par conséquent beaucoup moins de place dans cet état, et il y aura du *vide* dans la capacité.

Le petit appareil, fig. 8, mettra ce fait en évidence.

L'eau contenue dans la chaudière *f* est exposée à l'action du feu, la petite cuve *ll* est remplie d'eau froide, et peut commu-

niquer, comme on le voit, avec la capacité ou cylindre creux *bb*, le robinet *h* est fermé, la cuve *ee* est aussi remplie d'eau; on voit le tube *cc* qui débouche dans la capacité *bb*, plongé presque jusqu'au fond de la cuve *ee;* le robinet *d* est fait de manière qu'en le tournant dans un sens il met l'eau de la cuve *ee* en communication avec la capacité *bb* par le tuyau ascensionnel *cc*, et qu'en le tournant en sens opposé, il ferme d'une part cette communication, et de l'autre il permet à l'air que contient et la capacité *bb* et le tuyau ascensionnel *cc* de s'échapper entièrement.

Supposons maintenant que l'eau de la chaudière soit en pleine ébullition, qu'on ouvre le robinet *a* et le robinet *d*, comme il convient pour laisser échapper l'air au dehors, la vapeur chasse devant elle l'air de la capacité *bb* et du tuyau *cc*, et finit par passer elle-même par le robinet *d*. Fermons à l'instant ce robinet ainsi que le robinet *a* qui amène la vapeur; la capacité *bb* et le tuyau *cc* ne contiendront plus que de la vapeur; or si nous ouvrons le robinet *h* une petite quantité d'eau froide entrera dans la capacité *bb*, et au même moment on verra l'eau de la cuve *ee* s'élancer dans la capacité *bb* par le tuyau *cc*. Et que nous prouve ce phénomène? C'est que l'eau froide injectée par le robinet *h* a condensé la vapeur, ou en d'autres termes, l'a fait repasser à l'état liquide et a produit le vide dans la capacité *bb* et dans le tuyau *cc*. Il faut bien que le vide ait été formé, puisque la colonne d'air qui presse sur la surface de l'eau que contient la cuve *ee* a soulevé ce liquide, et l'a porté rapidement dans la capacité *bb* où nous devons supposer qu'il n'existait plus aucune pression, aucune force, capables de faire équilibre à la colonne d'air exerçant au dehors sa pression naturelle sur l'eau de la cuve *ee*.

Le phénomène incontestable que nous offre cet appareil

nous prouve deux choses : 1°. que la vapeur après avoir chassé l'air d'une capacité peut la remplir toute entière, et passer subitement du grand volume qu'elle occupe, à un volume beaucoup plus petit, en repassant à l'état liquide par son contact avec un peu d'eau froide, ce qui produit nécessairement du vide; 2°. qu'en produisant le vide elle met en action toute la force de pression dont l'air atmosphérique est capable.

Il faut se rappeler que, puisque la pression atmosphérique est équivalente à celle d'une colonne d'eau de 10^{m},394 environ, il est évident que la surface de l'eau contenue dans la cuve *ee* doit être au-dessous de 10 mètres de distance de la capacité *bb*, pour être sûr que l'eau de la cuve sera portée par l'atmosphère jusque dans cette capacité; si la distance était, par exemple, de 12 mètres l'eau de cette cuve n'y entrerait pas, quelque parfait que pût être le vide formé par la condensation de la vapeur; attendu que la pression atmosphérique n'a pas la puissance d'élever une colonne d'eau de 12 mètres, mais bien son équivalent qui n'est, comme nous l'avons rappelé plus haut, que de 10^{m},394 environ; encore faut-il que le vide soit parfait au-dessus de la colonne d'eau; il faut que la capacité où le vide doit être fait ne présente plus aucune force réagissante intérieure contre l'introduction de l'eau que l'atmosphère soulève, sans quoi l'eau ne montera pas à la hauteur ci-dessus.

Puisque la vapeur a la propriété de chasser l'air d'une capacité, de prendre sa place et de faire le vide en se condensant par sa mise en contact avec un jet d'eau froide, nous voyons manifestement que par son intermédiaire il est possible de faire usage de la pression atmosphérique comme force motrice; dans ce cas la vapeur ne sera plus qu'une sorte de moteur indirect dont toute l'action se bornera à faire le vide; l'air sera puissance directe.

Si donc nous pouvons mettre en jeu cette propriété de la vapeur par quelque mode d'application propre à faire un travail mécanique quelconque, nous aurons trouvé la solution de la première question que nous avons posée plus haut, c'est-à-dire que nous aurons trouvé le moyen de faire prendre à l'air un certain mouvement qui devient un moteur immédiat, applicable à toutes sortes d'opérations mécaniques, mouvement que nous avions contre nous et qui nous occasionait une perte de force considérable, lorsque dans nos appareils précédens nous avions employé l'action directe de la vapeur sur le piston.

La fig. 9 nous représente un appareil au moyen duquel on peut obtenir l'effet dont nous parlons.

Le cylindre *d* ouvert à son extrémité supérieure, porte sur un de ses côtés une petite soupape *o* qui s'ouvre de dehors en dedans et une autre en *i* qui s'ouvre de dedans en dehors.

Lorsqu'on fait agir le contre-poids *p* attaché par une tige au balancier *ff*, le piston *e* se soulève et aussitôt la soupape *o* s'ouvre et laisse entrer de l'air sous le piston; celui-ci se trouvant dès lors également pressé par l'atmosphère dessus et dessous, cède aisément à l'action d'un contre-poids qu'on a rendu assez fort pour vaincre le poids propre et le frottement du piston contre les parois intérieures du cylindre.

Remarquons bien que cette fonction de la soupape *o* ou d'une disposition équivalente est, dans le cas présent, indispensable; car si l'air ne pouvait pas pénétrer sous le piston quand le contre-poids agit pour le soulever, vous auriez à vaincre tout l'effort de la colonne atmosphérique qui correspond à la surface du piston, et à lui imprimer le mouvement même de celui-ci. Il faudrait donc un énorme contre-poids pour avoir une puissance mécanique suffisante pour produire cet effet; et comme c'est précisément l'action de l'air qui doit servir de moteur

immédiat, et que vous n'obtiendrez cette action que par celle du contre-poids qui lui serait au moins égale, vous feriez en vain le vide sous le piston; lorsque le contre-poids l'aurait élevé, il ne redescendrait plus puisque la colonne d'air n'aurait pas la puissance de soulever le contre-poids pour le remettre en état d'agir une seconde fois.

Vous voyez donc que l'introduction de l'air sous le piston, lorsqu'il commence à s'élever, est une condition indispensable du moyen dont nous nous occupons maintenant, et qu'avec cette introduction il suffit d'un petit contre-poids pour soulever le piston.

Lors donc que le piston est arrivé au haut de sa course par l'action du contre-poids *p*, le robinet *b* s'ouvre, et la vapeur de la chaudière *a* vient chasser l'air que contient le cylindre, et le pousse par la soupape *i* en prenant sa place dans toute la capacité du cylindre; on ferme alors incontinent le robinet à vapeur *b*, et on ouvre pendant quelques instans le robinet d'injection *m* qui fournit de l'eau froide contenue dans le réservoir *h* par le tuyau de communication *nn*. L'arrivée de cette eau froide dans le cylindre condense subitement la vapeur et le vide se fait.

Or, aussitôt que le vide a lieu, la colonne atmosphérique presse le piston et le force à redescendre en soulevant le contre-poids *p*, qui, à son tour, fait remonter le piston; après quoi la même manœuvre de la vapeur se reproduit. Le piston nous donne donc un mouvement alternatif qui imprime au volant *g* un mouvement de rotation qu'on peut appliquer à tel usage qu'on désire.

Pour ne pas compliquer la figure, nous n'y avons compris ni les moyens de faire ouvrir les deux robinets *b* et *m* par la machine même, ni ceux qu'il faut employer pour évacuer l'eau

qui reste dans le cylindre après chaque injection, et pour l'empêcher de pénétrer dans le tuyau qui amène la vapeur.

Nous n'avons pour le moment d'autres vues, en montrant cet appareil, que de faire voir comment on peut tirer parti, comme force motrice, de la pression de l'atmosphère, en se servant de l'intermédiaire de la vapeur. La vapeur joue évidemment un autre rôle que plus haut : elle se borne ici à chasser une petite portion d'air renfermée dans un cylindre, et à y faire le vide par la propriété qu'elle a de se condenser lorsqu'elle est en contact avec un jet d'eau froide.

L'air qui, dans l'appareil, fig. 7, nous portait tant d'obstacles est donc véritablement le moteur dans l'appareil fig 9, ou du moins c'est le moteur immédiat, la vapeur n'ayant d'autre fonction que de le mettre en jeu.

Mais cette fonction, que la vapeur remplit, représente une puissance mécanique qui peut être immense, et on l'obtient cependant avec du combustible et de l'eau ; faire le vide dans le sein de l'atmosphère est donc produire une force motrice ; et toutes les fois qu'on pourrait le faire sans le concours du mouvement des corps pesans, disons mieux, sans le concours d'une force comme celle de l'homme, des animaux, de l'eau ou du vent, on aurait créé un moteur.

On fait le vide, ainsi que nous l'avons vu plus haut, par le mouvement d'un piston dans un corps de pompe disposé convenablement; mais pour mouvoir ce piston il faut employer une force au moins aussi grande que celle qui résulterait de l'action de l'atmosphère sur le vide obtenu de cette manière ; il vaudrait donc mieux, et il serait plus simple d'appliquer la force directement au travail qu'on aurait en vue, au lieu de la mettre en action par un détour en faisant le vide.

Avec la vapeur on n'a besoin d'aucune force étrangère pour

produire cet effet, et c'est dans ce sens qu'elle est un véritable moteur dont la puissance n'a été révélée qu'aux temps modernes.

Jusqu'à présent on ne connaît que la vapeur de l'eau bouillante pour faire le vide à volonté, avec économie et promptitude tout à la fois, dans une capacité déterminée. Il se peut que des recherches nouvelles donnent d'autres moyens analogues pour faire le vide ; mais pour qu'ils soient applicables aux opérations de l'industrie, il faut qu'ils soient simples, prompts, faciles, et surtout économiques.

Revenons à notre appareil : l'obligation de faire arriver de l'eau froide, pour que le vide ait lieu promptement sous le piston, complique nécessairement la machine, à raison des moyens qu'il faut employer, 1°. pour entretenir l'eau du réservoir *h*, ou plus généralement pour fournir l'eau nécessaire à l'injection; 2°. pour ouvrir, au temps marqué, le robinet qui fait ce service, et 3°. pour évacuer et l'eau d'injection et l'eau produite par la vapeur condensée.

On sait cependant que la vapeur entrée dans le cylindre est mise hors de toute communication avec la chaudière par la fermeture du robinet *b*, on sait, disons-nous, qu'elle peut se refroidir d'elle-même, et perdre ainsi une grande partie de sa force.

Si donc on voulait s'affranchir de l'obligation où nous sommes, avec notre appareil, d'injecter de l'eau froide pour chaque mouvement du piston de haut en bas, ne pourrait-on pas abandonner la production du vide, ou, si l'on veut, la mise en activité de la colonne atmosphérique à la propriété que possède la vapeur de se refroidir d'elle-même ? L'appareil deviendrait sans contredit beaucoup plus simple. Mais nous verrons en son lieu qu'outre l'extrême lenteur et la grande irrégularité du

mouvement qui pourrait se produire, nous n'obtiendrions pas le vide que nous cherchons, et nous serions loin d'avoir une force comme celle qui naît d'une condensation prompte par de l'eau froide.

Il n'en est pas de même de l'introduction de l'air par la soupape *o* pour aider le piston à remonter, en mettant en quelque sorte l'atmosphère en équilibre avec elle-même; on peut évidemment s'en passer, et confier à la pression de la vapeur le rôle que joue l'air en entrant par la soupape *o*.

En effet, si à l'arrivée du piston au bas de sa course, on ouvre le robinet *b*, la vapeur, qui a bien la force de chasser l'air introduit dans le cylindre par la soupape *o*, aura par conséquent aussi celle de faire au moins équilibre, ou plutôt elle exercera une pression un peu supérieure à la pression de la colonne d'air qui repose sur le piston, et le contre-poids n'aura à vaincre comme ci-dessus que le poids et les frottemens de ce piston; il sera même aidé par la vapeur. Celle-ci fera donc la fonction de l'air qu'on introduit par la soupape *o* dans la vue que le dessus et le dessous du piston éprouvent simultanément la même pression.

Du reste la manœuvre de l'appareil se fait de la même manière; il n'y a de changé que le temps auquel la vapeur est introduite : elle l'est aussitôt que le piston est redescendu; et dans notre première disposition, on ne la faisait agir que lorsque le piston était remonté.

On conçoit aussi que par cette nouvelle disposition la soupape *i*, par laquelle s'échappe l'air introduit, deviendrait inutile; l'issue ménagée pour la sortie de l'eau d'injection servirait à débarrasser l'intérieur du cylindre de quelques portions d'air et de vapeur qui pourraient rester après l'injection.

Si nous examinons maintenant le jeu de cet appareil, soit

qu'on le conserve tel que nous l'avons représenté, fig. 9, soit qu'on supprime les soupapes *o* et *i*, nous remarquerons que la force qui fait descendre le piston est bien plus considérable que celle qui le fait remonter : la première est représentée par une masse d'air atmosphérique, équivalente à une colonne de 76 centimètres environ de mercure ou à une colonne d'eau de $10^m,394$ environ, dont les bases seraient égales à la surface du piston, et se mouvant avec une vitesse due à la hauteur de la course même du piston, en supposant toutefois que le vide formé par l'injection soit parfait.

La seconde force qui fait remonter le piston est représentée par l'excès de pesanteur du contre-poids sur celle du piston, abstraction faite des frottemens; et comme il faut que la première force soulève le contre-poids chaque fois qu'elle fait descendre le piston, on ne donne à ce contre-poids que ce qu'il lui faut pour emporter le poids du piston et vaincre les frottemens.

Il s'ensuit donc que si notre appareil moteur fait un travail qui présente une résistance constante, uniforme, il opérera avec irrégularité, c'est-à-dire que le piston descendra toujours plus vite qu'il ne remontera; il lui faudrait, pour être régulier dans son mouvement, que la résistance du travail fût variable, qu'elle fût dans toute sa grandeur lorsque le piston descend, et qu'elle se réduisît à peu de chose lorsqu'il doit remonter.

L'irrégularité est dans la nature même de ce mode d'action de la vapeur : elle ne s'exerce pas avec continuité, elle s'interrompt après chaque mouvement de haut en bas, jusqu'à ce que le piston soit remonté; et ce ne pourrait être qu'au moyen de quelques combinaisons mécaniques qu'on rendrait cet appareil en état d'exécuter un travail d'une résistance uniforme.

On y parviendrait encore en doublant son effet de la ma-

nière suivante : on établirait deux cylindres semblables sur la même ligne ; chacun aurait son piston et communiquerait avec la chaudière ; le balancier serait porté par le milieu comme le fléau d'une balance ; on ferait arriver la vapeur alternativement sous chaque piston, et chaque cylindre aurait son robinet d'injection. Il est clair qu'avec cette disposition, la colonne d'air agirait de la même manière pour le mouvement de chaque piston, soit qu'il remontât, soit qu'il descendît, attendu que l'action de l'air serait toujours en exercice, tantôt sur un piston, et tantôt sur l'autre.

La force motrice, mise en action par la vapeur, opérerait ainsi une pression qui ne présenterait plus les interruptions qui ont nécessairement lieu dans l'emploi d'un seul cylindre.

L'effet mécanique est doublé par cette disposition, mais aussi l'on dépense le double de vapeur dans le même temps, et du combustible à proportion.

Puisque la force motrice directe qui agit ici est une colonne d'air atmosphérique qui *tombe* avec le piston, à chaque fois que la vapeur a fait le vide sous celui-ci, complètement ou partiellement, il est certain que, si le vide est complet, vous aurez pour force la masse entière de la colonne atmosphérique qui repose sur ce piston, tombant d'une hauteur égale à la hauteur de l'espace vide que vous aurez produit, ou, ce qui est la même chose, à l'étendue de la course du piston.

Mais si le vide est incomplet, qu'il reste, par exemple, de l'air ou de la vapeur après l'injection, votre puissance mécanique sera affaiblie ; car la force de ressort de la vapeur ou de l'air que vous aurez laissé sous le piston sera en opposition avec l'action de la puissance atmosphérique ; de sorte que vous n'aurez pour force effective que la différence qui se trouvera

entre la pression naturelle de l'atmosphère, et la pression dont est capable la force de ressort restée sous le piston.

Nous acquerrons plus loin la certitude que le vide que nous pouvons produire dans notre appareil, par des injections d'eau froide, n'est jamais parfait, et qu'au lieu du vide, nous avons, sous le piston, de l'air encore ou de la vapeur; mais la tension de ces fluides affaiblis est à divers degrés au-dessous de la pression naturelle de l'atmosphère; d'où il résulte que plus la tension de ces fluides est affaiblie, plus votre puissance mécanique a d'efficacité et d'énergie.

Si la tension de ces fluides restans après l'injection pouvait soutenir encore, par exemple, 38 centimètres de mercure, dans le tube barométrique, vous n'auriez en activité que la moitié de la pression naturelle de l'atmosphère, puisque cette dernière pression est représentée par 76 centimètres, ou deux fois 38 centimètres de mercure.

Un tube barométrique, mis en communication avec la capacité du cylindre où le vide se fait, vous indiquera donc ce qui reste de tension au-dessous du piston, et par conséquent à quoi se réduit la puissance effective de votre moteur.

Cette impossibilité physique de faire complètement le vide, dans notre appareil, nous occasione non-seulement une perte assez considérable de force motrice, mais elle nous met encore dans l'obligation de faire des dispositions telles que le piston, en descendant, chasse hors du cylindre tout ce qui reste au-dessous de lui, sans quoi la pression des fluides, graduellement accumulés sous le piston, finirait par faire équilibre à la pression atmosphérique et par anéantir la puissance motrice.

Cette perte de force est encore un des inconvéniens de notre appareil; nous allons parler d'un autre qui n'est pas moins grave.

Nous avons dit plus haut que pour obtenir le vide partiel auquel nous pouvons atteindre il faut que la vapeur soit refroidie jusqu'à un certain point par le contact de l'eau froide; il faut même que les parois du cylindre, qui se sont échauffées lorsque la vapeur y est entrée en venant de la chaudière, se refroidissent aussi. Chaque fois donc que la vapeur arrive dans le cylindre, elle l'échauffe à ses dépens et perd par-là une partie de son efficacité comme vapeur, ce qui donne lieu à une consommation de force inutile et qui peut être considérable.

Cet inconvénient n'aurait point lieu si l'on pouvait opérer la condensation de la vapeur hors du cylindre; car alors celui-ci, n'étant plus à chaque instant refroidi par l'eau d'injection, pourrait rester à peu près au même degré de chaleur que la vapeur, en sortant de la chaudière, lui aurait communiquée dès les premiers momens de la mise en train de l'appareil.

L'inconvénient de condenser la vapeur dans le cylindre même étant reconnue, l'idée d'établir à côté une capacité bien hermétiquement fermée, et de mettre cette capacité en communication avec le cylindre pour recevoir la vapeur de celui-ci, au moment convenable, semble devoir se présenter naturellement à l'esprit.

Supposons en effet, fig. 10, qu'on établisse à côté du cylindre une capacité *b* en communication avec ce dernier, par le tuyau *dd*.

Le piston *a* étant arrivé au haut de sa course, par l'action du contre-poids, vous ouvrez le robinet à vapeur *f*, le cylindre s'en remplit ainsi que la capacité *b*, en admettant que pour commencer vous avez ouvert une issue, pour la sortie de l'air, à quelque endroit de cette capacité *b*, issue que vous bouchez lorsque le tout est rempli de vapeur.

Maintenant si vous injectez de l'eau froide dans la capacité *b*

en tournant le robinet *c*, le vide s'y fera : or il est évident qu'aussitôt que la vapeur du cylindre, et le piston qui la suit, poseront sur ce vide, l'action atmosphérique s'exercera, la vapeur du cylindre se précipitera dans la capacité où elle se condensera à son tour, et le piston descendra comme si la condensation s'était opérée immédiatement dans le cylindre. Cet effet a lieu plus promptement qu'on ne le décrit.

Vous voyez manifestement que par cette disposition vous ne refroidissez plus le cylindre dans lequel le piston doit se mouvoir, et qu'il peut s'échauffer assez par l'influence de la vapeur pour ne plus offrir l'inconvénient que nous avons voulu éviter.

Si cependant la communication *dd* entre le cylindre et la capacité *b* était toujours ouverte, un autre inconvénient se présenterait, c'est-à-dire qu'à chaque introduction de vapeur, vous rempliriez et le cylindre et la capacité *b*, et dans celle-ci une portion de vapeur se condenserait inutilement à chaque fois. Pour mettre l'appareil en train, vous avez été obligé de chasser l'air contenu dans le cylindre et dans la capacité ; mais quand il a été chassé une première fois, que la condensation s'est faite dans la capacité *b*, que le piston est descendu, le vide, tel qu'on peut l'obtenir, existe dans cette capacité ; or si la communication reste ouverte, aussitôt que vous ouvrirez le robinet à vapeur *f*, celle-ci se précipitera dans le vide sans utilité et la quantité qui y pénétrera sera perdue pour l'effet mécanique ; il faut donc qu'au moment de rouvrir le robinet *f*, pour faire arriver de nouvelle vapeur sous le piston, la communication du cylindre avec la capacité soit interrompue par la fermeture du robinet *m*, et vous ne rouvrez ce dernier robinet que lorsque le piston est parvenu au haut de sa course et que le robinet *f* est fermé ; de cette manière vous évitez le refroidisse-

ment du cylindre et vous ne perdez point de vapeur qui n'ait agi dans la capacité *b*.

Cependant l'air que donnent l'eau qui bout, ainsi que l'eau d'injection, s'accumule dans la capacité *b* avec l'eau provenant de la condensation et de l'injection; le vide diminue graduellement, et en peu de temps il finirait par ne plus avoir lieu et le mouvement serait anéanti. Il faut donc faire évacuer constamment et l'air et l'eau de condensation, et un reste de vapeur s'il y en avait.

On se sert pour cela d'une petite pompe *ee* qui se meut par l'action même de la machine, et on parvient de cette manière à conserver un vide partiel dans la capacité *b*, qu'on nomme *condenseur* et à entretenir le mouvement-moteur du piston.

Il faut se rappeler que l'action motrice est intermittente, et qu'il faudrait employer deux cylindres et deux pistons, ainsi que nous l'avons dit plus haut, pour la rendre continue; une seule chaudière et un seul condenseur pourraient suffire.

Mais l'emploi de deux cylindres et les diverses dispositions qu'ils exigent pour exécuter avec la précision requise leurs fonctions, par le mouvement même de la machine, ajoutent beaucoup aux dépenses et à la complication de construction de cette machine; on sera bientôt à même d'en juger par les détails dans lesquels le sujet important qui nous occupe nous oblige d'entrer.

Il semblerait donc que la solution, que nous venons de faire connaître, de la question de savoir si, comme nous l'avons proposé plus haut, il ne serait pas possible de faire servir la pression de l'air de puissance motrice au moyen de la vapeur; il semblerait, disons-nous, que cette solution ne serait guère applicable qu'à des opérations mécaniques dont la résistance s'interrompt comme l'action même du moteur : telle serait,

par exemple, l'élévation d'une masse d'eau dans un vase, lequel se viderait à une certaine hauteur et redescendrait par son propre poids pour se remplir de nouveau; le moteur n'aurait d'effort à faire que pour monter ce vase.

La complication des deux cylindres a fait sentir la nécessité de chercher un autre mode d'action de la vapeur, sans renoncer pourtant à l'avantage précieux qu'on peut tirer de sa propriété de faire un vide partiel, mais subit.

CHAPITRE XXXIV.

Suite du même sujet.

Pour avoir une action motrice non interrompue avec un seul cylindre, il est évident qu'il faut absolument, comme dans un des premiers appareils dont nous avons parlé, faire agir la vapeur dessus et dessous le piston. Or, pour opérer de cette manière, le cylindre doit être hermétiquement fermé pardessus, et comme vous conservez le condenseur où la vapeur se rend et dans lequel vous devez entretenir constamment le vide, il suit que vous ne pouvez plus mettre en jeu la colonne atmosphérique, puisque vous ôtez avec le plus grand soin tout accès à l'air dans l'intérieur de votre appareil. Nous arrivons donc ainsi à la solution de la seconde question que nous nous sommes proposée plus haut, c'est-à-dire que nous cherchons à rendre l'atmosphère le témoin passif, s'il est permis de parler ainsi, du mouvement que vous créez avec la vapeur. Vous ne cherchez plus à avoir pour vous l'action de l'air, mais aussi

vous ne voulez plus l'avoir contre vous, comme dans le premier mode d'action que nous avons examiné.

L'appareil fig. 11 est destiné à donner une idée de la solution de cette seconde question. Nous avons supprimé plusieurs détails qu'on voit dans les figures précédentes, mais qu'encore une fois on verra mieux lorsque nous en serons venus à examiner ces questions comme elles sont résolues aujourd'hui.

Nous n'avons donc fait entrer dans cette figure que ce qui est absolument nécessaire pour nous faire entendre au point où nous en sommes.

La première chose à faire pour mettre cet appareil en train, c'est d'introduire de la vapeur non-seulement dessus et dessous le piston, mais encore d'en remplir le condenseur et tous les conduits de la machine, afin de chasser l'air qui se trouve dans les uns et dans les autres. Nous ne dirons pas à présent comment on y parvient, il nous suffira d'assurer que cela se fait sans difficulté.

Lors donc que l'appareil est plein de vapeur dans tous ses points, et que le piston *o* est, supposons, au bas de sa course, on injecte de l'eau froide du réservoir *m* dans le condenseur *f* par le tuyau *nn*, et le vide s'y fait subitement. Pendant ce temps on tourne le robinet *c* dans un sens tel qu'il ouvre non-seulement la communication entre la chaudière et le dessous du piston en *b*, pour forcer celui-ci à s'élever, mais qu'il ouvre encore la communication entre la vapeur qui peut se trouver au-dessus du piston en *a* et le condenseur *f* par le tuyau *dd*.

Or qu'arrive-t-il? la vapeur qui est en *a* au-dessus du piston se précipite dans le vide du condenseur, et s'y condense à mesure qu'elle y arrive. La vapeur, qui fait monter le piston, agit donc sur ce vide comme agissait la colonne d'air avec l'appareil

précédent. Voilà pour ce qui concerne l'élévation du piston.

Pour le faire descendre on tourne le robinet *c* dans l'autre sens, et alors la communication entre la chaudière et le *dessus* du piston est établie, ainsi que la communication entre la vapeur qui se trouve *sous* le piston après l'action, et le condenseur qui reste toujours ouvert pour recevoir la vapeur qui a opéré dessus ou dessous le piston. Celui-ci redescend donc en vertu de la pression de la vapeur, qui agit aussi sur le vide comme précédemment.

On voit ici la force de la vapeur produire seule le mouvement alternatif de haut en bas et de bas en haut; et comme dans les deux cas elle agit sur le vide qu'on entretient dans le condenseur par une injection continuelle d'eau froide, l'air extérieur ne coopère plus à l'effet.

Notre seconde question serait ainsi résolue complétement, c'est-à-dire que nous n'aurions pas l'air en opposition à notre mouvement-moteur, si, par l'injection de l'eau froide, nous faisions un vide complet, ou du moins un vide partiel qui restât toujours au même degré; mais nous avons vu plus haut que la vapeur et l'eau froide amènent de l'air qui, venant se cantonner dans le condenseur, détruirait le vide si l'on n'évacuait pas cet air par une pompe adaptée au condenseur.

Or le mouvement de cette pompe est en opposition avec la colonne d'air qui repose sur le piston, et il faut que celui-ci soulève cette colonne à chaque mouvement de bas en haut : c'est un inconvénient qui paraît inévitable. Il en résulte donc que le mouvement de cette colonne atmosphérique vient encore à la charge de la machine, ou, si l'on veut, du piston moteur qui doit mettre en jeu cette pompe à air. Cette opposition n'est plus aussi puissante que dans nos premiers appareils, parce que le piston de la pompe à air a moins de diamètre que

le piston moteur et une course moins étendue. Cependant elle consomme inutilement pour le travail une assez grande quantité de puissance mécanique ; la seconde question n'est donc pas entièrement résolue; nous pourrons juger par ce que nous verrons plus loin si elle peut l'être jamais d'une manière absolue.

Quoi qu'il en soit, cette manière d'employer la force de la vapeur donne un mouvement-moteur très-régulier au moyen des précautions et des diverses dispositions dont nous avons parlé plus haut.

En effet, la vapeur arrivant à chaque fois dans le cylindre avec le même degré de force, et le vide partiel se maintenant au même point dans le condenseur, la pression est la même, soit pour faire monter le piston, soit pour le faire descendre.

La puissance mécanique qui résulte de cette pression est d'autant plus grande qu'il y a plus de différence entre la force de tension de la vapeur agissante, et celle des petites portions d'air et de faible vapeur dont nous savons qu'on ne peut pas débarrasser entièrement le condenseur, et qui réagissent plus ou moins contre le mouvement du piston.

Jamais au surplus cette petite force de tension qui reste toujours dans le condenseur n'équivaut ou du moins ne doit équivaloir à la pression atmosphérique. Il suffit dès lors de donner à la vapeur une tension un peu supérieure à la pression de l'atmosphère, pour faire marcher la machine et lui donner même une très-grande puissance.

Or la vapeur, à ce degré de force, n'exige pas des enveloppes aussi solides que lorsqu'on la fait agir, comme dans le premier mode, sans condensation, et par conséquent en opposition directe avec le poids de l'atmosphère; c'est assurément un avantage réel, mais remarquons qu'il faut l'acheter par les disposi-

tions du condenseur et de ses dépendances qui compliquent le système et augmentent les frais et même les difficultés de construction.

Dans les trois différens modes sous lesquels nous venons de présenter l'action de la vapeur comme puissance mécanique, nous avons toujours supposé qu'on laissait affluer la vapeur dans le cylindre jusqu'à ce qu'il en fût entièrement rempli ou que le piston fût parvenu au bout de sa course. Ce n'est qu'alors seulement que le robinet à vapeur s'est fermé, et que la communication entre le cylindre et la chaudière a été suspendue; mais il est aisé de concevoir que, pendant que la vapeur s'introduit dans le cylindre, il s'en reforme de nouvelle incontinent; de telle sorte que, pendant le temps de l'introduction, la chaudière en fournit assez pour maintenir la vapeur au même degré de tension et dans la chaudière et dans le cylindre, bien qu'elle ait plus d'espace à occuper qu'avant l'ouverture du robinet, et celle de la communication avec la capacité du cylindre. Il en résulte que la force expansive de la vapeur ne peut pas se développer, et qu'elle arrive dans le cylindre comme un ressort bandé qui semblerait rester dans cet état, n'ayant pas l'espace nécessaire pour se débander. Il y a bien, au premier instant de l'action de la vapeur sur le piston, un mouvement subit de détente; mais il doit être bientôt comprimé par la vapeur nouvelle qui afflue sans interruption pendant la durée de la course du piston.

La vapeur peut donc conserver, après son action, la même ou à peu près la même force qu'elle avait en commençant, et c'est dans cet état qu'on la laisse échapper au dehors, dans l'atmosphère, ou qu'on la fait passer dans le condenseur pour la détruire.

Ainsi, dans ces divers modes d'action, on perd toute la puis-

sance mécanique qui pourrait résulter du développement de la force expansive de la vapeur, et celle qui lui reste après avoir exercé son action.

Cette considération a donné naissance à une autre manière de faire agir la vapeur, fondée d'une part sur une des propriétés de celle-ci, et de l'autre sur l'idée de ne perdre ou de ne détruire la vapeur qu'après avoir tiré de sa puissance tout ce que peut offrir l'appareil dont on fait usage.

Ce quatrième mode de faire agir la vapeur donne lieu à deux systèmes de construction : le premier consiste à fermer le robinet à vapeur avant que le piston n'ait achevé sa course, comme, par exemple, lorsqu'il est arrivé au tiers, à la moitié, aux deux tiers, en un mot à une fraction quelconque de sa course.

Dans ce cas, aussitôt que le robinet est fermé, la vapeur introduite et réduite à elle-même se détend et agit dans le premier instant avec toute l'intensité de force d'expansion qu'elle possède, sur le piston qu'elle continue d'élever.

Maintenant on peut se demander s'il y a*, en quelques circonstances*, une limite de détente *en dedans* de laquelle la vapeur agit toujours *sensiblement* avec la même force; ou bien si, *en toutes circonstances,* la force primitive de la vapeur introduite s'affaiblit à mesure qu'elle se détend et du moment même qu'elle commence à se détendre.

Si l'on répondait par l'affirmative à la première question, il faudrait déterminer cette limite pour les divers degrés de force que la vapeur prend lorsqu'elle est pénétrée plus ou moins de chaleur.

Et si l'on reconnaissait, par exemple, que de la vapeur à tel degré de force, et en certaines circonstances, peut se détendre sans que son ressort soit sensiblement affaibli, dans un espace

double ou triple, il est clair qu'on produirait autant d'effet en n'introduisant de la vapeur dans le cylindre que jusqu'à la moitié ou au tiers de la course du piston, et en lui laissant ainsi la faculté de s'étendre dans un espace double ou triple : on ferait une grande économie dans la dépense de la vapeur, sans rien perdre du côté de la régularité du mouvement-moteur.

Mais, au contraire, si cette limite n'existe pas, et que, conformément à la seconde question, la vapeur commence à s'affaiblir du moment même de la détente, il faudrait, d'une part, proportionner le travail ou la résistance, non pas à la force primitive de la vapeur, mais à sa force moyenne, c'est-à-dire à la force qui tient le milieu entre la force primitive de la vapeur et celle qu'elle a conservée lorsque le piston est arrivé au bout de sa course; il faudrait, d'autre part, pour donner quelque régularité au mouvement-moteur, ne pas porter trop loin l'affaiblissement du ressort de la vapeur, en lui laissant trop d'espace pour se détendre, et disposer en outre l'appareil de manière que l'excès de pression que reçoit le piston au commencement de l'action s'accumulât dans la machine, pour renforcer ou aider, en quelque sorte, la vapeur lorsqu'elle est arrivée à un certain point d'affaiblissement. Sans une disposition de cette nature, et dont il sera question en son lieu, la vitesse du piston diminuerait graduellement, soit en montant, soit en descendant.

On conçoit que cette diminution graduelle de la vitesse doit être d'autant plus sensible qu'on introduit à chaque fois une moindre quantité de vapeur, et qu'on laisse plus d'espace libre à son mouvement de détente. Elle serait sans doute très-peu sensible si la détente n'avait à parcourir qu'une petite portion de la capacité du cylindre, ou de la course du piston; mais

alors moins vous laissez développer la détente, plus la vapeur conserve de force après l'action et réciproquement.

Comme nous n'avons encore, au point où nous en sommes de l'étude des machines à vapeur que des notions très-superficielles sur ce sujet, nous ne chercherons pour le moment, ni ce qui se passe lorsque la vapeur se détend, ni à prononcer sur les deux questions posées plus haut : nous y reviendrons.

Il semble du moins permis de dire à présent que, dans un cas comme dans l'autre, mais surtout dans le second, il y a de l'avantage à laisser achever la course du piston, par la simple détente de la portion de vapeur introduite dans le cylindre, et après la fermeture du robinet; l'arrivée du piston au bout de sa course est moins brusque, il ne vient point heurter le couvercle du cylindre, et il en résulte toujours quelque économie dans la dépense de la vapeur. Nous verrons, quand il en sera temps, les moyens qu'on peut employer pour varier à volonté les quantités de vapeur qu'on met en action à chaque fois, et par conséquent le degré de détente qu'on veut laisser prendre à cette vapeur.

Le second système de construction peut avoir pour objet de faire agir la vapeur une seconde, une troisième fois, après sa première action, ce qui semble exiger autant de cylindres et de pistons qu'on veut multiplier l'action d'une certaine quantité de vapeur introduite dans le cylindre qui est en communication directe avec la chaudière.

Ainsi, dans ce système, voulez-vous faire agir la même vapeur, deux, trois ou quatre fois, il vous faudra deux, trois ou quatre cylindres, et voici *quelle pourrait en être la disposition*.

Rappelons-nous d'abord que la vapeur d'une certaine intensité de force qu'on introduit dans un seul cylindre, et qui ne cesse d'y affluer, tant que dure la course du piston, jouit encore d'une force considérable après cette première action.

Supposons donc, fig. 12, que les trois cylindres aient été remplis de vapeur, pour la mise en train, comme nous l'avons vu plus haut.

Ouvrez le robinet 1 du premier cylindre, de manière à faire arriver la vapeur de la chaudière sous le piston; ce piston s'élève et lève en même temps les pistons des deux autres cylindres par la manière dont ils sont attachés au balancier.

Mais la vapeur qui est au-dessus du premier piston, peut s'échapper et venir agir sous le second piston, par le robinet 2 qu'on ouvre en même temps que le robinet 1, et la vapeur qui est au-dessus du second piston vient agir de même sous le troisième piston par le robinet 3 qu'on ouvre avec les robinets 2 et 1.

Remarquons que les portions de vapeur qui se trouvent au-dessus des deux premiers pistons se précipitent vivement dans chaque cylindre qui doit les recevoir, puisque la première action de la vapeur sur le premier piston les fait lever tous les trois et présente par conséquent le vide à la vapeur qui doit agir sous chacun d'eux.

Voilà donc les trois pistons arrivés ensemble au haut de leur course respective; il s'agit maintenant de les faire tous redescendre.

Pour cela vous fermez les robinets 2 et 3 et vous ouvrez le robinet 1 pour faire arriver la vapeur de la chaudière sur le premier piston en même temps que vous ouvrez les deux autres robinets 4 et 5.

Le premier piston, en descendant, fait descendre avec lui les deux autres pistons, et la vapeur qui est sous le premier passe par le robinet 4 sur le second piston, et celle qui est sous le second piston passe sur le troisième par le robinet 5, après quoi les pistons remontent comme ci-dessus.

Le robinet 6, attaché au troisième cylindre, est destiné à envoyer, à la condensation ou dans l'air, la vapeur après ses trois actions successives, tant celle qui se trouve dessus que dessous le dernier piston.

Vous voyez, dans ce système, que la quantité déterminée de vapeur introduite dans le premier cylindre, après avoir exercé son action sur le piston de ce cylindre, agit encore deux fois avant de se perdre ou d'être détruite. Il semblerait donc qu'avec une telle disposition on serait le maître de n'abandonner chaque portion de vapeur fournie par la chaudière qu'après en avoir extrait, si l'on peut parler ainsi, la plus grande partie de sa puissance mécanique.

En donnant, comme on le voit fig. 12, des diamètres différens aux divers cylindres dont l'appareil est composé, et en attribuant le plus grand diamètre au cylindre destiné à recevoir la vapeur qui a agi le plus de fois, et qui, par conséquent, a perdu le plus de force, on cherche à favoriser de plus en plus et graduellement sa détente, et à offrir à son action une plus grande surface de piston.

Remarquez bien que cet appareil ne pourrait marcher, si la vapeur qui, de la chaudière, vient agir sur le premier piston, le plus petit des trois, n'avait pas assez de force pour commencer à les soulever tous ; car alors la vapeur qui, par exemple, se trouverait au-dessus de chacun, ne pouvant s'échapper, résisterait et empêcherait le mouvement du premier piston.

Mais lorsque la vapeur est assez puissante dans sa première action pour soulever les trois pistons à la fois, celle qui a déjà servi au mouvement précédent trouve passage pour exercer encore son action et coopérer à l'effet de la vapeur nouvelle, puisque le mouvement que l'une et l'autre vapeur tendent à imprimer, est toujours dans le même sens. C'est ainsi qu'on

profite de la détente de la vapeur autant qu'on peut la porter par les dispositions de l'appareil, c'est-à-dire par le nombre de cylindres et par les degrés d'augmentation de leurs diamètres.

Il faut bien que, dans ce système, les cylindres aillent en augmentant de diamètre, le plus petit communiquant immédiatement avec la chaudière, car s'ils étaient égaux et que l'on supposât que la vapeur ne se refroidît point en passant d'un cylindre à l'autre, il n'y aurait point de détente, et quel que fût le nombre de cylindres, on perdrait ou l'on enverrait à la condensation, de la vapeur qui pourrait avoir conservé toute sa force primitive; mais on verra que les choses ne se passent pas ainsi lorsque nous serons en état de les expliquer.

Au surplus, à ne considérer que le principe du système que nous examinons, il n'y a pas de raison pour ne pas porter plus haut le nombre des cylindres de l'appareil fig. 12; mais les dépenses et les difficultés de construction, les frottemens des pistons, les contrariétés de mouvemens que peut présenter le jeu compliqué de tant de pièces, semblent devoir augmenter dans une grande proportion avec le nombre de cylindres employés.

Il est vrai de dire que si les dispositions de cet appareil donnent une idée du système dont il s'agit, elles ne représentent cependant pas celles qu'on adopte ou qu'on adopterait dans la pratique; il faut des dispositions plus simples et en même temps plus propres à concerter les mouvemens divers, desquels naît le mouvement-moteur.

Nous ne pouvons, pour le moment, insister davantage sur ce quatrième mode de recevoir la force motrice de la vapeur, sans sortir des bornes que nous avons cru devoir nous imposer dans l'étude préliminaire de ce moteur. Ce que nous en avons

dit suffira pour faire sentir les différences qui le distinguent des autres modes que nous avons précédemment décrits.

Il faut nous rappeler maintenant que le point d'application de la force de la vapeur a toujours été un piston dans un corps de pompe, que ce mode d'application uniforme n'a présenté que les quatre changemens suivans que nous avons considérés comme quatre manières différentes de faire agir la vapeur, savoir :

1°. En donnant à la vapeur un tel degré de tension par l'action du feu, qu'elle soit en état de mouvoir la colonne atmosphérique qui repose sur le piston, et d'exécuter en outre un travail mécanique quelconque.

2°. En donnant également à la vapeur un haut degré de puissance, comme nous l'avons vu en dernier lieu, et en profitant de la force qu'elle développe lorsqu'elle se détend dans un ou plusieurs cylindres.

On donne aux machines à vapeur qui sont fondées sur ces deux modifications, le nom de *machines à haute pression.*

3°. En bornant l'action de la vapeur à faire un vide partiel sous le piston, et faisant agir ainsi la pression de l'atmosphère, comme moteur immédiat : c'est ce qu'on appelle *machine atmosphérique.*

4°. Enfin en faisant agir la vapeur à un degré de tension seulement un peu supérieur à la pression naturelle de l'atmosphère, et faisant le vide par de l'eau froide injectée dans une capacité séparée qu'on nomme *condenseur :* c'est ce qu'on appelle machine *à basse pression*, ou *à pression ordinaire.*

L'on donne le nom de *machine à simple effet* lorsque la vapeur agit exclusivement dessus ou dessous le piston, et de *machine à double effet* lorsqu'elle agit alternativement dessus et dessous.

Jusqu'à présent on n'a pas trouvé d'autres moyens d'*une application avantageuse* de faire agir la vapeur comme puissance mécanique, et c'est dans le cercle des quatre modifications, que nous venons de rappeler, que sont renfermées toutes les constructions de machines à vapeur que l'industrie a pu jusqu'aujourd'hui destiner à son usage.

C'est donc dans le même cercle que nous devons nous renfermer nous-mêmes en traitant le moteur qui nous occupe. En sortir pour discuter les diverses tentatives qui ont été faites à diverses époques, dans le dessein de faire agir la vapeur autrement que nous ne l'avons exposé plus haut, ce serait en quelque sorte méconnaître les arrêts de l'expérience qui les a condamnées, et accorder à des rêves ou à des conceptions plus ingénieuses que solides, une attention que réclame toute entière l'étude si compliquée de la vapeur comme puissance mécanique industrielle.

Néanmoins si l'occasion se présente, nous pourrons citer ce qu'on a proposé de plus raisonnable à ce sujet, et il ne nous sera peut-être pas difficile de montrer que ces divers moyens proposés n'ont pu l'être que par des personnes qui ne connaissaient pas assez à fond, ou qui méconnaissaient la nature des agens dont le concours est indispensable dans la production et l'application de la force motrice de la vapeur.

En reportant nos regards en arrière, il est impossible de n'être pas frappé de tout ce qui doit accompagner la production de cette force, de tout ce qui peut exercer sur elle une influence imminente, de tout ce qui doit coopérer à son développement.

Dans ce concert de causes, agissant dans le but unique de produire le mouvement alternatif du piston, vous avez pu en remarquer de deux espèces : les unes sont les phénomènes que présente l'action du feu sur l'eau, ceux que peut offrir la va-

peur considérée en elle-même et résultant de cette action, ceux de l'eau froide ou du froid sur la vapeur, et enfin les phénomènes auxquels donne lieu la présence de l'air dans la production de la force dont il est question.

Les autres sont des combinaisons mécaniques artificielles destinées à faire apparaître les phénomènes divers, et à marquer le temps, la durée et l'étendue de leurs développemens.

Nous appelons causes, les combinaisons mécaniques, non pas assurément comme recélant en elles-mêmes quelque élément de force, puisqu'elles ne sont constituées que de pièces matérielles arrangées pour produire un certain effet, au moyen de la vapeur, mais bien comme étant les auxiliaires indispensables du développement constant et régulier de la manière d'employer la force de celle-ci.

Nous avons vu, à la vérité, que le jeu des divers systèmes de machines à vapeur a pour principe originaire et créateur du mouvement, ou la seule force expansive de la vapeur, ou cette force unie à la propriété qu'elle a de repasser à l'état liquide et de faire le vide sous la pression de l'atmosphère par une injection d'eau froide.

Mais la vapeur, comme puissance mécanique n'est pas donnée, dans la nature, comme l'eau, le vent, les moteurs animés; il faut la produire par l'action du feu sur l'eau, il faut la contenir dans des enveloppes assez solides pour vous mettre à l'abri de son explosion, et disposées de manière à pouvoir user de cette force comme vous le trouvez bon; il faut diriger son action, la régler, la renouveler, la transformer, et enfin savoir anéantir ou disperser chaque portion de cette puissance après l'action instantanée que vous lui avez fait exercer.

Or les dispositions mécaniques, destinées à produire ces effets divers, peuvent être considérées comme entrant néces-

sairement dans la composition de la puissance mécanique de la vapeur, et l'on n'avancerait guère dans la connaissance de ce moteur si l'on n'en étudiait que le principe d'action, et qu'on négligeât l'examen des dispositions essentielles qui le mettent en valeur.

Ce n'est pas tout : il ne suffit pas de savoir produire cette force, il faut encore que ce soit avec économie et dans des limites de dépenses qui soient telles qu'on puisse l'appliquer avec avantage à des travaux industriels. Le succès de ce moteur dépend de l'accord parfait qui règne entre les temps d'introduction de la vapeur et les mouvemens de pièces qui en règlent l'action ; mais l'économie consiste à produire le plus de vapeur avec le moins de combustible possible, à conserver à la vapeur toute sa force avant l'action, à n'employer que les quantités rigoureusement nécessaires pour vaincre la résistance du travail, à favoriser le développement de sa puissance, et à le porter aussi loin que peut le permettre la nature des choses, enfin à simplifier la machine autant qu'il est possible, sans rien perdre de la force qu'on peut attendre de la quantité de combustible employé.

Dans tout ce qui précède, nous nous sommes bornés à montrer seulement la possibilité de faire servir la vapeur d'eau de force motrice, et à donner, comme faits, les phénomènes principaux sur lesquels cette possibilité est fondée ; mais nous ne connaissons encore ni l'origine, ni la nature de ces phénomènes ; nous ne savons pas quelles sont les circonstances qui peuvent en arrêter ou en favoriser le développement.

Nous avons fait apercevoir par quel genre de combinaisons mécaniques on pouvait espérer de faire durer et de régler l'action motrice de la vapeur, de la convertir en un mouvement applicable à un travail industriel, et de faire servir ce mouve-

ment même à l'exécution des diverses fonctions qui le produisent, de telle sorte que, l'action de la vapeur étant donnée, la machine marche d'elle-même sans l'intervention nécessaire d'aucune force étrangère.

Mais ce n'est pas assez pour assurer le succès et l'économie du service de ce moteur compliqué. Les conditions de l'un et de l'autre sont, ainsi que nous l'avons déjà dit, rigoureusement renfermées, d'une part, dans une appréciation exacte des qualités de la vapeur, de la manière de la produire, des circonstances extérieures qui influent ou peuvent influer sur l'intensité de sa force; et d'autre part, dans la détermination précise des moyens les plus efficaces et en même temps les plus simples de se rendre maître de cette force si subtile, si fugace; de la contenir, de la faire agir comme on veut, où l'on veut, quand et aussi long-temps qu'on le veut, en lui confiant à elle-même le soin de s'entretenir et de se régler.

Nous avons donc maintenant à pénétrer au fond de notre sujet sous ce double point de vue, et nous allons chercher des solutions aux deux séries de questions suivantes, qui se rattachent immédiatement à tout ce qui est nécessaire pour s'expliquer ou pour améliorer le jeu de la vapeur, dans son action, comme force motrice.

1re. Série de questions relatives aux agens naturels qui concourent à l'effet d'une machine à vapeur.

1°. Comment produit-on la chaleur et comment agit-elle en général?

2°. Quelle est l'action de la chaleur sur les corps solides; quels sont les phénomènes qu'ils présentent, lorsqu'ils sont pénétrés d'une chaleur extraordinaire? Se pénétrent-ils tous indistinctement de la même quantité de chaleur, et quand ils

en sont pénétrés, peuvent-ils la conserver ou la perdre, et comment la conservent-ils ou la perdent-ils?

3°. Quelle est l'action de la chaleur sur les liquides, et principalement quels sont les phénomènes que présente l'eau dans ses relations avec la chaleur?

4°. Quelle est son action sur les fluides aériformes?

5°. Quelles sont les propriétés mécaniques de la vapeur et les circonstances qui influent sur sa force?

6°. Quelle quantité de vapeur, à tel degré de tension, peut-on produire avec une certaine quantité de divers combustibles?

7°. Quels sont les phénomènes que présente ou auxquels donne lieu la vapeur lorsqu'elle sort d'une chaudière par divers orifices et à divers degrés de tension?

8°. Une chaudière étant donnée, avec la quantité d'eau requise, combien sortira-t-il de vapeur en un certain temps, par divers orifices, et à quels degrés de tension?

9°. Dans quel rapport doit être la grandeur de l'orifice de sortie, avec la capacité de la chaudière pour obtenir toujours une vapeur au même degré de tension?

10°. Enfin quelle influence peuvent exercer les tuyaux de conduite sur les dépenses de vapeur et sur l'intensité de sa force?

2e. *Série de questions relatives aux détails d'appareils et aux moyens mécaniques employés pour tirer parti de la vapeur comme force motrice.*

1°. Quelles sont en général les dispositions les plus convenables à donner aux fourneaux et aux chaudières pour produire de la vapeur?

2°. Quelles sont les précautions à prendre pour se mettre à l'abri de l'explosion de la vapeur?

3°. Quels sont les appareils destinés à alimenter d'eau les chaudières à vapeur?

4°. Quels sont les moyens les plus propres à diriger et à régler l'action de la vapeur?

5°. Quels sont les moyens de modérer l'action de la vapeur lorsqu'elle acquiert un excédant de force?

6°. Quelles sont les dispositions du piston, du cylindre et de la boîte à étoupe dans laquelle glisse la tige?

7°. Enfin quels sont les meilleurs moyens de condensation et de production de vide?

Les réponses que nous allons chercher à cette double série de questions vont non-seulement nous donner la théorie des divers modes d'action de la vapeur, comme puissance mécanique, mais encore nous diriger dans le choix des combinaisons mécaniques les plus propres à nous faire obtenir de cette puissance le plus d'effet possible, dans l'état actuel de nos connaissances.

C'est alors que nous pourrons étudier avec fruit les diverses espèces de machines à vapeur, dans leur ensemble, et telles qu'elles sortent de bons ateliers de construction, et calculer leurs effets en diverses circonstances.

C'est enfin avec ces lumières, avec ces connaissances préliminaires sur tout ce qui peut concerner le moteur dont nous nous occupons, que le génie ou l'habileté peuvent s'ouvrir une route nouvelle et chercher les améliorations dont ce sujet peut être susceptible.

CHAPITRE XXXV.

Des agens naturels qui concourent à l'effet des machines à vapeur.

Première question. *Comment produit-on la chaleur et comment agit-elle en général?*

Le principe de la force de l'eau et de l'air, comme puissances mécaniques, est la pesanteur; le principe de la force que nous examinons est le *feu*, que la plupart des physiciens appellent *calorique* ou la cause cachée de ce qui produit sur nous la *sensation de chaleur.*

Les savans sont partagés de sentimens sur la nature de la cause qui produit la chaleur : les uns donnent une existence matérielle à cette cause; ils la représentent comme un fluide infiniment subtil, actif, élastique, qu'ils nomment, ainsi que nous venons de le dire, calorique; les autres considèrent la chaleur comme le résultat d'un mouvement particulier, de vibrations intestines qui affectent les molécules des corps lorsqu'ils produisent la sensation de chaleur.

Si l'on n'est pas d'accord sur la nature de la cause, on l'est du moins sur les effets qui, seuls, doivent appeler notre attention, et si, pour exprimer ces effets, nous donnons le nom de corps fluide à ce qui les produit, ce n'est pas que nous voulions nous permettre de prendre parti pour l'une ou l'autre opinion, mais bien pour rendre nos explications plus simples et plus claires. Que la cause de la chaleur soit un corps particulier, ou une simple modification des corps échauffés, les faits

sont les mêmes : il s'agit de les bien observer et de les décrire fidèlement, et il n'y a point d'inconvénient à les attribuer à l'action d'un fluide dont l'existence est au moins apparente, si elle n'est pas réelle. Ceci, au reste, n'apporterait aucun changement dans les détails dans lesquels nous allons entrer.

On obtient du calorique de trois manières différentes, savoir : 1°. en recueillant celui que le soleil répand sur la terre avec ses rayons de lumière; 2°. par l'action d'une puissance mécanique, d'un moteur quelconque; 3°. par la mise en jeu d'une force qu'on appelle *chimique*, et dont l'action s'exerce mystérieusement entre les molécules des corps en contact.

La chaleur que produisent naturellement les rayons du soleil ne dépasse guère 48 degrés centigrades; c'est-là tout ce qu'on peut obtenir sans le concours d'aucun artifice, d'aucun appareil; et ce degré de chaleur ne suffit point à la production d'une force applicable aux opérations mécaniques.

En été on peut l'élever et la porter en peu de minutes, jusqu'à plus de 100 degrés centigrades, en recueillant les rayons solaires dans des enveloppes capables d'absorber la chaleur sans la perdre sensiblement, ce qui donne une chaleur supérieure à celle qui est nécessaire pour amener l'eau à l'état d'ébullition : une boîte revêtue intérieurement de bois de liége bien sec, charbonné à sa surface, et recouverte d'un verre bien transparent, donne ce degré de chaleur, lorsqu'on l'expose, pendant quelques minutes à l'action directe des rayons solaires.

Mais si ces rayons sont comme réunis, rapprochés par le moyen d'un verre ou d'un miroir ardent, la chaleur qu'on obtient est très-considérable, et ne le cède point à celle du feu le plus violent.

Ce moyen est assurément très-efficace pour pénétrer d'une grande chaleur, de petites masses; il n'est guère praticable pour

de grandes, à raison des difficultés nombreuses que présenteraient les dispositions à faire pour concentrer à la fois un très-grand nombre de rayons solaires.

Un frottement vif, une forte percussion, une compression rapide, qu'on peut opérer par une puissance mécanique quelconque, produisent une grande quantité de chaleur.

Le comte de Rumfort, en faisant frotter une pièce d'acier sur de la fonte, produisit assez de chaleur pour mettre en ébullition, au bout de deux heures et demie, environ $8^{kil},5$ d'eau dont la température, au commencement de l'expérience, n'était que de $15°,55$ centigrades.

On sait qu'on parvient à allumer deux morceaux de bois secs en les frottant vivement l'un sur l'autre; qu'on met en fusion, par le simple frottement, des parcelles d'acier, en battant le briquet contre la pierre. Deux meules à blé s'échauffent fortement lorsqu'on les fait mouvoir rapidement trop rapprochées l'une de l'autre.

La quantité de chaleur qu'on obtient ainsi par le frottement est très-considérable; elle l'est aussi lorsqu'on réduit le volume d'un corps par une forte percussion ou par une subite compression : ainsi un morceau de fer devient rouge quand on le frappe vivement à coups redoublés. L'air qu'on refoule rapidement sur lui-même jusqu'à diminuer son volume de moitié, montre dans cet état une augmentation de température de $27°77$ centigrades, et si l'on pousse plus loin la compression, il s'échauffe au point d'allumer de l'amadou; c'est ce qu'on voit dans les briquets dits *pneumatiques*.

La production de chaleur, par le frottement, la percussion ou la compression, exige une grande dépense de puissance mécanique, et l'effet qui en résulte n'est pas en rapport avec cette dépense, si l'on met en comparaison celui qu'on obtient en met-

tant en jeu ce que nous avons appelé plus haut force chimique.

On ne fait usage que de ce dernier mode, lorsqu'on veut produire une chaleur durable à différens degrés d'intensité. Non-seulement ce mode est le moins coûteux, mais il sera peut-être toujours le seul praticable.

On donne vulgairement le nom de *combustion* au développement de l'action de cette force chimique; action invisible, naturelle comme celle de la pesanteur, d'une puissance incalculable, et qui, pour être mise en jeu, n'exige de l'homme d'autre sacrifice que celui du corps combustible qu'on lui donne à dévorer.

Il ne nous appartient pas d'expliquer la théorie de la combustion : c'est dans les ouvrages de chimie qu'il faut l'étudier; nous nous bornerons à dire que la quantité de calorique qu'on produit par la combustion ordinaire est fournie toute entière, ou presque toute entière par l'air atmosphérique, et que par conséquent sa présence est toujours indispensable, pour qu'il y ait combustion ou production de chaleur.

La *tourbe*, naturellement spongieuse, est plus propre qu'un feu actif à produire une chaleur douce, uniforme; elle est préférable lorsqu'elle est charbonnée; elle le serait aussi, si, en la fabriquant, on la rendait plus dense, plus compacte par une forte compression.

Le *bois*, la *houille* ou *charbon de terre* brûlent avec une flamme très-vive lorsqu'on fait arriver tout l'air nécessaire dans le fourneau. La flamme est le résultat de la combustion des substances volatiles qui s'échappent de ces corps lorsqu'ils brûlent, et elle produit une très-grande quantité de chaleur; mais si l'air n'était point fourni avec assez d'abondance, et si le feu n'avait pas assez d'intensité, les substances volatiles ne s'enflammeraient point, et se dissiperaient non-seulement en

pure perte, mais elles étoufferaient encore jusqu'à un certain point la combustion. La fumée qui se dégage du bois vert éteint le feu lorsqu'il n'est pas très-ardent, et lorsque la chaleur du foyer est très-considérable, le bois vert produit plus de chaleur que le bois sec, parce que cette fumée se brûle.

Le *bois* et la *houille carbonisés* s'allument plus facilement, et ne donnent point de fumée pendant la combustion. Comme le premier ne laisse que peu de cendres, l'air en traverse la masse avec beaucoup de facilité; la seconde en fournit d'avantage; tous deux produisent une chaleur très-intense; mais le premier se consume beaucoup plus promptement que le second combustible.

L'esprit de vin, les huiles, les graisses, la cire, les résines, le gaz hydrogène sont aussi des combustibles d'un emploi facile et souvent commode; cependant on ne s'en sert guère que pour produire une chaleur douce; ils sont trop chers pour être employés dans la quantité qu'exigerait le besoin d'une grande intensité de chaleur.

Le choix, au reste, qu'on peut faire entre ces différentes espèces de combustibles, dépend, si l'on peut parler ainsi, du genre de feu qu'on veut avoir. Voulez-vous un feu vif, ardent, dont les émanations calorifiques soient rapides, abondantes? vous emploierez un combustible qui brûle avec éclat, et produit beaucoup de flamme; voulez-vous un feu doux, mais soutenu? vous vous servirez d'un combustible qui brûle lentement.

Quel que soit, au surplus, le combustible dont on fasse usage, quelle que soit même la source d'où l'on tire le calorique, on le voit, à sa naissance, au moment qu'il est produit, agir de deux manières: 1°. il pénètre, il s'insinue entre les molécules des corps en contact avec les matières même dont il

émane; 2°. si les corps sont à distance, il les atteint, parce qu'il sort de tous les points d'une *masse brûlante* des torrens de chaleur qui franchissent l'espace et vont exercer leur effet à de certaines distances.

Le calorique rayonne donc comme la lumière; comme elle aussi il se *réfracte* en passant par des corps transparens, c'est-à-dire que son mouvement change de direction en traversant ces corps; comme elle il est réfléchi par des surfaces polies, et si vous exposez d'une manière convenable un miroir concave, par exemple, aux rayons de calorique qui émanent d'un foyer, ces rayons sont comme repoussés par le miroir, et vous dirigez une grande quantité de chaleur vers un point sur lequel les rayons se rejoignent, et qui, sans cette disposition, ne serait pas sensiblement atteint par les émanations directes du foyer. Enfin que l'action du calorique soit directe ou réfléchie, il se meut dans l'espace avec une telle vitesse, qu'il paraît difficile de l'évaluer.

Deuxième question. *Quelle est l'action de la chaleur sur les corps solides, et quels sont les phénomènes qu'ils présentent lorsqu'ils sont pénétrés d'une chaleur extraordinaire? Se pénètrent-ils tous indistinctement de la même quantité de chaleur, et quand ils en sont pénétrés peuvent-ils la conserver ou la perdre, et comment la conservent-ils ou la perdent-ils?*

On ne peut pas séparer de l'usage d'un foyer en combustion l'obligation de l'environner, en tout ou en partie, de corps solides, pour contenir la masse brûlante et pour recevoir le calorique produit, soit pour ne pas le transmettre (si cela se pouvait), soit pour le transmettre à d'autres corps après l'avoir reçu : les corps solides qui contiennent cette masse brûlante sont les parois du fourneau; ceux qui doivent recevoir le calo-

rique, sans nécessité de transmission, sont les corps qu'on expose directement à son action pour les fondre ou les rougir fortement ou simplement les échauffer; enfin ceux qui reçoivent le calorique pour le transmettre, et qui ne servent que d'intermédiaires, ce sont les chaudières de divers genres.

Puis donc que, dans tout état de choses, un foyer en activité de service est toujours environné de corps solides, il s'agit de bien connaître et d'apprécier la nature des relations du calorique avec ces corps, et les phénomènes qu'ils présentent lorsqu'ils en sont pénétrés.

Tous les corps solides indistinctement reçoivent du calorique dans leur sein, soit, ainsi que nous l'avons dit plus haut, par leur contact immédiat avec le corps en combustion, soit à distance, en vertu de la propriété qu'a ce fluide de se mouvoir avec une grande vitesse en rayonnant dans l'espace.

Ce mouvement rapide du calorique se ralentit infiniment à son entrée dans les corps solides. Une tringle de fer de 54 centimètres de longueur, en contact avec un feu ordinaire, par une de ses extrémités, et portant à l'autre un thermomètre, ne transmet de chaleur sensible à ce thermomètre qu'après *quatre* minutes de temps.

Le passage du fluide dans cette tringle est, comme vous voyez, bien lent, et la quantité qui en passe paraît peu abondante, puisqu'au bout de 15 minutes le thermomètre centigrade ne marque que 8°,33 au-dessus de la température du milieu environnant.

Le calorique, en pénétrant ainsi dans les corps solides, doit s'ouvrir ou trouver un passage à travers les molécules qui les composent, soit en les écartant légèrement, soit par l'attraction qu'elles exercent sur lui. Il semble donc ne pouvoir être *conduit* de molécule à molécule qu'avec beaucoup de lenteur, et,

dès lors, que la température des couches transversales de la tringle de fer, dont nous venons de parler, doit diminuer d'une manière uniforme à partir de l'extrémité en contact avec le feu.

Quant à la quantité de calorique transmise au travers de cette tringle, il semble évident qu'elle est proportionnelle à l'élévation de température à laquelle l'extrémité de la tringle est portée par le feu qu'elle touche.

Mais remarquons avec M. Thompson, que la pénétration du calorique dans un corps, au moyen de la faculté conductrice de celui-ci, doit avoir une limite, et cette limite dépend des quantités de calorique avec lesquelles la couche la plus voisine de la source qui le produit est susceptible elle-même de se combiner. Si la longueur d'un corps était telle que le nombre des couches qui le composent excédât celui des doses de calorique avec lesquelles une de ces couches peut s'unir, il est évident que le calorique ne pourrait être conduit à travers le corps, c'est-à-dire que celles de ces couches qui se trouveraient les plus éloignées de la source du calorique ne pourraient acquérir aucun accroissement de température.

Dans tous les cas cette limite dépend de la quantité de calorique avec laquelle un corps peut se combiner avant de changer d'état. Tous les corps, autant que nous pouvons actuellement en juger, sont capables de se combiner indéfiniment avec le calorique; mais son accumulation, à un certain degré, les fait, pour la plupart, changer d'état : ainsi, par sa combinaison avec une certaine dose de calorique, la glace devient *eau*, et celle-ci en se combinant avec une certaine quantité de ce fluide, est a son tour convertie en *vapeur*. Par l'application du calorique à des degrés convenables, les métaux se fondent, se volatilisent; le bois et presque tous les autres combustibles prennent feu et se dissipent.

Toutes les fois donc que la première couche d'un corps s'est combinée avec toute la quantité de calorique que ce corps peut recevoir sans changer d'état, il est évident qu'il ne peut plus en admettre, car par l'addition d'une autre dose, la première couche serait dissipée ou séparée.

Pour ce qui concerne la faculté qu'ont les corps de conduire le calorique, elle dépend de la nature particulière de chacun d'eux. Ceux qui jouissent de cette faculté au plus haut degré, le transmettent avec le plus de rapidité et à la plus grande distance. La densité des corps paraît-être, en quelque sorte, la mesure de leur efficacité comme conducteurs; cependant l'affinité respective de chacun d'eux pour le calorique doit y influer d'une manière très-sensible. En considérant les corps classés par séries, on peut établir, comme règle générale, que la série des plus denses sera celle des meilleurs conducteurs; mais si l'on examine particulièrement les corps d'une série, on ne trouvera pas toujours que ce soit dans les plus denses de cette série que réside la faculté conductrice la plus énergique.

Puisque les corps conduisent le calorique en vertu de leur affinité pour ce fluide, et que cette affinité existe dans tous les corps, il s'ensuit que tous les corps doivent être conducteurs, à moins que leur faculté à cet égard ne soit contrariée par quelque autre propriété. Si, par exemple, un corps était d'une nature telle qu'une simple dose de calorique suffît pour y produire un changement d'état, il est évident que ce corps ne pourrait pas être conducteur du calorique, car aussitôt que chaque rang de ses molécules se serait combiné avec cette dose, elles changeraient de place, et ne pourraient alors communiquer le calorique aux couches voisines.

Les corps solides sont donc conducteurs, parce que tous sont capables de se combiner avec différentes doses de caloriques

avant d'éprouver aucun changement d'état. C'est ce qui a lieu, à un degré très-remarquable, à l'égard des métaux, des pierres, des matières végétales et animales. Ceci cependant doit s'entendre avec certaines restrictions : tous les corps sont bien en effet conducteurs, mais ils ne le sont pas dans toutes les circonstances. La plupart des solides sont conducteurs à la température ordinaire de l'atmosphère, mais ils cessent de l'être quand ils sont chauffés à la température à laquelle ils changent d'état : ainsi à la température de 15°,50 centigrades, le soufre est conducteur, mais il ne l'est plus à 101 degrés centigrades, terme auquel il fond, ou se volatilise. La glace conduit également le calorique, quand elle est au-dessous du point de congélation; mais à zéro elle perd cette faculté, parce qu'alors la moindre addition de calorique la fait changer d'état. (*Voyez Système de chimie de Tompson.*)

Dans l'examen que nous ferons de la faculté qu'ont les corps solides de conduire le calorique, soit qu'ils le reçoivent par contact immédiat, soit à distance par le rayonnement, nous ne tenons pas compte de l'influence de la surface de ces corps et de diverses circonstances extérieures sur lesquelles nous reviendrons bientôt; nous ne considérons donc, pour le moment, que la perméabilité intérieure que les solides offrent au calorique.

Cette perméabilité ils ne la possèdent pas tous au même degré, comme nous l'avons déjà dit, c'est ce qui fait distinguer ces corps en deux classes : *les bons conducteurs du calorique*, et *les mauvais conducteurs*.

Plusieurs physiciens ont fait des expériences dans la vue de déterminer les différences que présentent les corps solides dans leurs facultés conductrices respectives; nous allons rapporter les résultats que M. Despretz a obtenus des siennes; le procédé

qu'il a employé paraît préférable à ceux dont on s'était servi avant lui.

Il a trouvé que la conductibilité du cuivre est plus grande que celle du fer dans le rapport de 12 à 5.

Le fer, le zinc et l'étain ne diffèrent pas beaucoup entre eux par cette qualité. La conductibilité du plomb est moindre de *moitié* que celle du fer, et *cinq fois* plus petite que celle du cuivre.

Le marbre est *deux fois* meilleur conducteur que la porcelaine, et sa faculté conductrice n'est que la *seizième partie* de celle que possède le fer.

Enfin la terre de brique et la porcelaine ont à peu près la même conductibilité, qui n'est que la moitié de celle du marbre.

Voici l'ordre de conductibilité en commençant par la plus grande dans lequel M. Despretz range les solides qu'il a soumis à l'expérience.

Cuivre.	Plomb.
Fer.	Marbre.
Zinc.	Porcelaine.
Étain.	Terre de brique.

Il serait à désirer qu'on connût aussi bien les rapports de conductibilité de quelques autres métaux, de la fonte, par exemple, du cuivre coulé et de quelques autres substances, comme les sables, les bois, le charbon, etc. : on sait néanmoins que le charbon est, parmi les corps solides, un des plus mauvais conducteur; que la limaille de fer conduit beaucoup moins bien que le fer en barre, la sciure de bois que le bois : nous en verrons plus loin les raisons.

Il résulte de cette inégalité, dans la faculté conductrice de divers solides, qu'il n'est pas indifférent d'employer tel ou tel corps lorsqu'on veut contenir, envelopper le calorique pour en

diriger l'action sur quelque point, ou bien lorsqu'on veut le transmettre avec le plus d'abondance possible par l'intermédiaire d'un solide.

Ainsi, par exemple, si vous voulez porter le calorique, qui émane d'un foyer, à la partie supérieure, vous feriez un contre-sens si vous formiez les parois latérales de ce foyer avec des substances métalliques toutes nues, avec des plaques de cuivre ou de fer; comme vous en feriez un, si, pour conduire le calorique où vous voudriez l'avoir, vous vous serviez de l'intermédiaire du marbre ou de la porcelaine ou même du plomb au lieu d'employer du cuivre, la matière étant indifférente sous d'autre rapports.

Quoi qu'il en soit de cette inégalité dans les facultés conductrices respectives des solides, le calorique passe au travers et s'y accumule en différentes doses ; examinons donc maintenant les phénomènes que nous présentent les corps lorsqu'ils sont pénétrés de chaleur.

Un corps chaud, placé dans l'air, est le centre d'une multitude de rayons de calorique qui en émanent dans toutes les directions. Les corps environnans les absorbent ou les réfléchissent. Si le corps est en présence d'un autre corps aussi chaud ou plus chaud que lui, non-seulement il lui enverra de la chaleur par le rayonnement, mais il en recevra à son tour, puisque tous les deux lancent du calorique de tous les points de leurs surfaces. Cet effet a lieu, quelle que soit la température, et il est d'autant plus marqué que les corps sont plus échauffés.

Les physiciens donnent le nom de *pouvoir émissif* à cette faculté qu'a le corps échauffé de lancer, dans l'espace, le calorique qu'il recèle. Le pouvoir émissif d'un corps est d'autant plus grand que ce corps est élevé à une plus haute température,

et vous perdez d'autant plus de chaleur par l'intermédiaire d'un corps que vous l'aurez plus échauffé, et que vous l'aurez plus rapproché d'autres corps disposés à recueillir la chaleur qui émane de celui-là.

On appelle *pouvoir absorbant* cette dernière faculté des corps, et *pouvoir réfléchissant* celle par laquelle ils repoussent les rayons calorifiques qui se projettent sur eux.

Ces trois pouvoirs dépendent principalement de l'état de la surface des corps.

Une surface noire et mate donne à un corps échauffé un pouvoir émissif qui peut être six ou sept fois plus considérable que celui d'un corps dont la surface serait parfaitement polie. Ainsi, échauffez fortement et au même degré deux cylindres égaux, de cuivre, par exemple, mais que la surface de l'un soit d'un poli bien éclatant, et que celle de l'autre soit recouverte de noir de fumée ou simplement rayée avec du sable; le second cylindre se refroidira beaucoup plus tôt que le premier, parce qu'une surface mate, raboteuse, semée de petites aspérités, insensibles même à la vue simple, favorise singulièrement l'émission du calorique dont le corps est pénétré.

Mais un corps chaud qui, par l'état de sa surface, jouit d'un pouvoir émissif considérable, jouit aussi, à un degré élevé, du pouvoir absorbant, lorsque vous le mettez froid dans le voisinage d'un corps plus chaud; tandis qu'un corps à surface polie dont le pouvoir émissif est peu considérable, possède à un haut degré le pouvoir réfléchissant; d'où l'on peut conclure que ces pouvoirs semblent se balancer : les corps qui fournissent beaucoup de chaleur par irradiation ont la faculté d'en absorber beaucoup des corps environnans, et ceux qui en émettent peu réfléchissent aussi une grande partie de celle qui leur est envoyée par les corps voisins.

La conséquence pratique qu'on peut tirer de ces faits incontestables, c'est que si vous voulez échauffer promptement un corps et l'empêcher de se refroidir de même, dépolissez la portion de surface qui doit recevoir l'action de la chaleur et polissez tout le reste : recouvrez, par exemple, d'un enduit noir l'intérieur d'un cylindre que vous voulez échauffer en dedans et maintenir à une certaine température, et donnez le plus de poli possible à la surface extérieure. Vous affecterez ainsi la surface intérieure d'un pouvoir absorbant considérable, et la surface extérieure de la faculté d'émettre très-peu de la chaleur absorbée.

Si vous vouliez au contraire qu'un cylindre, dans l'intérieur duquel des courans de chaleur auraient à passer, s'échauffât le moins possible, vous poliriez le dedans afin de réfléchir le plus de chaleur possible, ou si l'on veut, afin d'en absorber le moins possible, et vous dépoliriez le dehors pour émettre avec le plus de promptitude, la petite quantité de chaleur absorbée.

Ces facultés qu'on désigne sous les noms de pouvoirs *émissif*, *absorbant*, *réfléchissant*, ne sont attribuées qu'à la surface des corps et doivent être distinguées de celle qu'on peut appeler *pouvoir conducteur* dont il a été question plus haut, et qui consiste dans la facilité plus ou moins grande qu'ont les corps de porter la chaleur d'une molécule à l'autre. Ce pouvoir conducteur est tout-à-fait indépendant de l'état de la surface des corps et des circonstances extérieures.

La chaleur que les corps perdent par le rayonnement, en vertu de leur pouvoir émissif, n'est, d'après les remarques de M. Fourier, qu'une assez petite partie de celle que le corps abandonne lorsqu'il se refroidit dans l'air ou dans un milieu élastique : la plus grande partie de cette chaleur perdue ne s'échappe point en rayons d'une longueur sensible; elle est

communiquée à l'air par voie de contact, elle dépend principalement de l'espèce du milieu et de la pression.

D'où il suit que ce n'est pas assez de mettre dans l'état qui convient la surface du corps auquel on veut conserver le plus long-temps possible la chaleur qu'il a reçue, il faut encore éloigner de lui toutes les circonstances qui peuvent contribuer à lui faire perdre sa chaleur par le contact.

Il suit encore de tout ce que nous venons de dire que le calorique, qu'il soit conduit et accumulé dans un corps, qu'il soit réfléchi ou absorbé à la surface de celui-ci, avec plus ou moins d'énergie, le calorique, disons-nous, est toujours en mouvement et tend, par sa seule force, à se distribuer dans les corps de manière à leur donner à tous la même température.

En effet, vous pouvez, en tenant pendant un temps suffisant une barre de fer dans le feu, accumuler dans son sein assez de chaleur pour la rougir; mais si, après l'avoir retirée du feu, vous l'exposez à l'air, elle ne conservera pas le calorique dont elle est pénétrée; elle le perdra et se refroidira par degrés jusqu'à ce qu'elle arrive à la température des corps environnans.

D'un autre côté, si vous rendez une barre de fer plus froide, en la tenant pendant quelque temps recouverte avec de la neige, et que vous la portiez ensuite dans une chambre échauffée, elle ne se maintiendra pas à la basse température qu'elle avait : elle deviendra plus chaude par degrés, jusqu'à ce qu'elle ait acquis la température de la chambre. Il paraît donc qu'aucun corps ne peut conserver une température plus haute au milieu de corps plus froids que lui, non plus qu'une température plus basse, lorsqu'il est environné de corps plus chauds. Le calorique, en quelque quantité qu'il se soit accumulé dans un corps,

finit par se répartir entre les corps contigus, qui, éprouvés au thermomètre, se montrent tous arrivés à la même température. Cette distribution égale de calorique s'opère plus ou moins promptement, suivant les dimensions ou la nature des corps en présence, mais à la fin elle a toujours lieu. (*Voyez Thompson, ouvrage cité, et MM. Biot, Thénard, etc.*)

L'air, comme milieu dans lequel les corps échauffés sont plongés, est le véhicule, comme nous l'avons dit plus haut, d'une bonne partie du calorique qu'ils abandonnent. Leurs facultés conductrices dépendent également du milieu : elles sont constantes si les températures et le milieu le sont aussi, mais elles diminuent par degrés à mesure que la température des corps chauds se rapproche de celle du milieu ambiant. Le rayonnement au reste n'a point lieu lorsque le corps pénétré de chaleur est plongé dans un liquide quelconque; on ne le remarque que dans l'air ou dans quelque autre milieu élastique.

Voici comment l'auteur cité plus haut explique l'action refroidissante du milieu dans lequel un corps chaud est plongé: la portion de ce milieu qui est en contact avec le corps, acquiert, par le calorique qu'elle reçoit de celui-ci, une pesanteur spécifique différente de celle qu'elle avait; elle cède en conséquence sa place à une portion nouvelle qui, étant échauffée à son tour, suit la précédente, et il s'établit ainsi un courant qui accélère de beaucoup la marche du refroidissement. Il faut remarquer que la vitesse de ce courant, devant être d'autant plus grande que la température du corps chaud sera plus élevée, l'effet en diminuera à mesure que la différence entre la température du corps chaud et celle du milieu deviendra plus petite.

En augmentant artificiellement les courans, il est évident

qu'on accélèrera proportionnellement la marche du refroidissement, et tel est sur celui des corps chauds l'effet du vent.

Il paraît, en effet, d'après les expériences de M. Leslie, que, toutes choses égales d'ailleurs, le pouvoir refroidissant d'un courant d'air est proportionnel à sa vitesse, ou, ce qui est la même chose, à la vitesse du mouvement du corps chaud dans le milieu plus froid. Ainsi une boule chaude dont la température, dans un air calme, s'abaisserait d'un certain nombre de degrés en cent-vingt minutes, perd, en l'agitant dans cet air, avec des vitesses différentes, la même quantité de calorique dans des temps qui diminuent comme la vitesse augmente : c'est ce que montre la table suivante.

VITESSE.	TEMPS DU refroidissement.
De 2160 millimètres par seconde.	60 minutes.
De 6480.	30
De 19440.	12

Il paraît cependant que l'influence de la vitesse sur le refroidissement ne dépasse pas certaines limites : il pourrait arriver que la pression produite sur l'air, par le corps en mouvement, dégageât certaine portion de calorique de celui-là. Le professeur Pictet a remarqué qu'on pouvait faire monter un thermomètre de plusieurs degrés en dirigeant sur la boule de cet instrument un courant d'air rapide.

Buchanan a remarqué que l'air condensé refroidit les corps plus rapidement que l'air à sa densité ordinaire, et que l'air raréfié refroidit moins rapidement que de l'air plus dense; il a

consulté à ce sujet l'expérience, et il en a obtenu les résultats suivans :

DENSITÉ de l'air.	REFROIDISSEMENT.
	Secondes.
2.	85
1.	100
$\frac{1}{2}$.	116
$\frac{1}{4}$.	128
$\frac{1}{8}$.	140
$\frac{1}{16}$.	160
$\frac{1}{32}$.	170

En mettant à part l'influence du rayonnement, dans l'acte du refroidissement, M. Dalton croit que la chaleur enlevée par l'air ou par le gaz ambiant, suit à peu près la proportion de la racine cubique de la densité.

La théorie du refroidissement la plus généralement admise, théorie qui se fonde sur la tendance du calorique à se mettre en équilibre, est celle de M. Prévost, de Genève. Il considère le calorique comme un fluide dont chaque molécule, lorsqu'il est à l'état de liberté, se meut avec une vitesse extrême. Les corps chauds émettent des rayons calorifiques dans tous les sens, mais les molécules en sont tellement écartées, que plusieurs faisceaux de ces rayons peuvent, comme ceux de la lumière, s'entrecroiser sans se troubler mutuellement dans leurs directions.

Si l'on suppose donc deux espaces voisins où le calorique abonde, il devra y en avoir un échange continuel entre ces deux espaces. Si dans les deux, le calorique est en même quantité, les échanges seront égaux et la température continuera d'être la même; mais si l'un en contient plus que l'autre, il y aura

inégalité dans les échanges, l'espace le moins chaud recevra plus de calorique qu'il n'en donnera; et par une répétition continuelle de cet échange inégal, l'équilibre de température se rétablira.

Si l'on suppose un corps placé dans un milieu plus chaud que lui, et dont la température est constante, on pourra considérer le calorique de ce milieu comme consistant en deux parties dont l'une est égale à la portion que le corps en contient, et l'autre à celle d'où résulte la différence de température entre le corps et le milieu; et comme à l'égard de la première les échanges entre le corps et le milieu se balancent et sont égaux, c'est la seconde seulement ou celle qui produit l'excès de température qu'il s'agit de considérer. Or, relativement à cet excès, le corps est absolument froid ou dépourvu de calorique. Si, dans une seconde, le corps reçoit 0,1 de cet excès de calorique, cet excès ne sera plus à la fin de la première seconde, que de 0,9; il en passera encore 0,1 dans le corps pendant la seconde suivante, et l'excès à la fin de cette seconde, ne sera plus que des 0,9, des 0,9, ou du $(0,9)^2$ à la fin de la troisième seconde, cet excès sera réduit à la troisième puissance de 0,9 ou à $(0,9)^3$; il sera à la quatrième puissance de 0,9 ou à $(0,9)^4$ à la fin de la quatrième seconde, et ainsi de suite, de sorte que suivant la loi observée par Richmann, les temps croissant en progression arithmétique, les différences d'excès diminueront en progression géométrique.

On voit, dit M. Thompson, par cet exposé de la théorie de Prévost, qu'elle est entièrement fondée sur le rayonnement du calorique, et que la faculté des corps, pour le conduire n'y entre point en considération. On ne peut, continue-t-il, révoquer en doute le rayonnement du calorique; il est même extrêmement probable que c'est par lui que s'opère la distribution égale de

température qui n'aurait lieu que très-lentement, et peut-être même jamais complètement par la seule faculté conductrice du calorique, mais on ne peut disconvenir que cette propriété des corps n'influe d'une manière sensible sur la durée du temps nécessaire, pour que les corps contigus arrivent à l'égalité de température. La théorie de Prévost pourrait donc être regardée comme imparfaite, en cela seul qu'il n'a pas eu égard à cette circonstance.

Soit que les corps solides reçoivent du calorique, ou qu'ils en perdent après en avoir reçu, nous venons de leur trouver quatre qualités remarquables qu'ils ne possèdent pas tous au même degré; qualités qu'on nomme pouvoirs conducteur, absorbant, émissif et réfléchissant. Le premier, le pouvoir conducteur, appartenant spécialement à la nature et à l'arrangement des molécules qui composent les corps est totalement indépendant de l'état de la surface et du milieu environnant; les autres au contraire, sont diversement modifiés par l'état de la surface et par la nature et la pression du milieu.

Nous venons de voir en outre qu'en vertu de l'inégale répartition de ces pouvoirs dans les corps solides, ces corps transmettent plus ou moins facilement la chaleur qu'ils ont reçue, et se refroidissent tous, mais dans des temps inégaux; qu'ils la reçoivent et s'échauffent tous, mais plus ou moins facilement; enfin que le calorique tend, par sa nature, à se mettre en équilibre aussitôt qu'il est accumulé sur un point dans un corps, et que la nature des corps, l'état de leurs surfaces, la nature et la densité du milieu environnant, favorisent ou entravent cette tendance qui finit toujours par l'emporter.

Il s'agit maintenant d'examiner un autre genre de phénomènes que nous offre l'action de la chaleur sur les corps solides.

Dès que la chaleur affecte un corps solide, il semble que les

molécules de celui-ci s'écartent les unes des autres; le volume du corps augmente d'une quantité très-petite, à la vérité, mais cependant susceptible d'évaluation ; on dit alors que le corps se *dilate*. Si, au contraire, le corps perd de la chaleur, son volume diminue aussi d'une quantité très-petite.

Les deux tables suivantes nous donnent les degrés de dilatation de diverses substances, lorsqu'elles passent de o de température à 100 degrés centigrades. On doit la première en partie à Smeaton.

NOMS DES substances.	TEMPÉRATURE.	DILATATIONS.
Platine	De o à 100°. centigrades	100,000 à 100087
Or	*id.*	100,000 à 100094
Argent	*id.*	100,000 à 100189
Cuivre	*id.*	100,000 à 100170
Fonte de cuivre. . .	*id.*	100,000 à 100188
Fil de cuivre	*id.*	100,000 à 100194
Fer.	*id.*	100,000 à 100126
Fonte de fer	*id.*	100,000 à 100111
Acier	*id.*	100,000 à 100112
Plomb	*id.*	100,000 à 100287
Étain	*id.*	100,000 à 100238
Zinc	*id.*	100,000 à 100296
Zinc écroui	*id.*	100,000 à 100308
Bismuth.	*id.*	100,000 à 100139
Antimoine	*id.*	100,000 à 100109
Zinc, huit parties. . Étain, une partie. .	*id.*	100,000 à 100239
Plomb, deux parties. Étain, une partie. .	*id.*	100,000 à 100151
Cuivre jaune, deux parties . . . . . . Zinc, une partie . .	*id.*	100,000 à 100205
Potée d'étain	*id.*	100,000 à 100228
Cuivre, huit parties. Étain, une partie. .	*id.*	100,000 à 100182

Deuxième table des dilatations linéaires qu'éprouvent diverses substances, depuis le terme de la congélation de l'eau jusqu'à celui de son ébullition, d'après les expériences de MM. Laplace et Lavoisier.

NOMS des substances.	DILATATION pour une règle égale à l'unité.
Acier non trempé	0,00107915
Acier trempé, jaune, recuit à 65°.	0,00123956
Argent de coupelle.	0,00190974
Argent au titre de Paris.	0,00190868
Cuivre	0,00171733
Cuivre jaune.	0,00187821
Étain des Indes	0,00193765
Id. de Falmouth.	0,00217298
Fer doux, forgé.	0,00122045
Fer rond, passé à la filière.	0,00123504
Mercure (en volume) (1)	0,0184776
Or de départ.	0.00146606
Or au titre de Paris, non recuit.	0,00155155
Id. recuit.	0,00151361
Platine (selon Borda)	0,00085655
Plomb.	0,00284836
Flintglass anglais.	0,00081166
Verre de France, avec plomb	0,00087199
Tube de verre, sans plomb	0,00089694
Glace de Saint-Gobain.	0,00089089

Les auteurs de cette table reconnurent que le verre et les métaux éprouvent des dilatations sensiblement proportionnelles à celles du mercure; en sorte qu'un nombre de degrés double du thermomètre donne une dilatation double; un nombre de degrés triple, une dilatation triple; et ainsi de suite. L'acier trempé seul présente des écarts très-extraordinaires, car sa dilatation allait toujours en diminuant d'une manière

(1) On lit pour la dilatation du mercure 0,018018; page 138 de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*, année 1822.

sensible à mesure que la température était plus élevée, et quoiqu'on n'eût pas dépassé, dans les expériences relatives à ce métal, le quatre-vingt-unième degré du thermomètre centigrade; mais, suivant la remarque de ces célèbres physiciens, l'acier trempé à froid doit éprouver probablement un commencement de *recuit* lorsqu'on chauffe à 81 degrés, et la dilatabilité doit se rapprocher graduellement de celle de l'acier *non trempé*, qui, comme on sait, est moins considérable. Quoi qu'il en soit, la dilatation totale de l'acier trempé entre 0 et 81°25 parut être de 0,0010067. (*Voy. Annales de Chimie et de Physique, tome* I, *page* 101 *et* 102.)

On voit, par ces tables, que les corps solides se dilatent inégalement, bien que placés dans les mêmes circonstances; l'étain se dilate plus que le cuivre, et le cuivre plus que le fer.

Il y a plus : MM. Dulong et Petit ont trouvé que chaque corps solide en particulier se dilate d'une manière inégale pour le même nombre de degrés pris sur les différentes parties de l'échelle thermométrique, et que par conséquent la dilatation d'un de ces corps n'est jamais proportionnelle au degré de chaleur qu'il éprouve : elle croît avec la température; de sorte qu'un métal, par exemple, se dilate un peu plus en passant de 200 degrés à 300 degrés, qu'en passant de 100 degrés à 200 degrés. Cet accroissement devient surtout très-sensible un peu avant la fusion du corps. On a trouvé que la dilatation du verre est plus prompte que celle du mercure. (*Voy. Annales citées plus haut, tome* II, *page* 254 *et suivantes.*)

La dilatation n'est pas le seul changement que les corps solides éprouvent lorsqu'ils reçoivent l'action du calorique, puisque tous peuvent passer à l'état liquide.

La conversion des corps solides en liquides s'opère, dit Thompson, tout d'un temps, et sans aucun intervalle entre la

solidité et la fluidité dans quelques cas; dans d'autres cas, cette conversion n'a lieu que graduellement. Le solide devient d'abord mou, et passe lentement par tous les degrés d'amollissement, avant d'être parfaitement fluide.

La conversion de la glace en eau est un exemple de changement dans le premier cas; à l'égard de cette substance, il n'existe pas d'état intermédiaire entre la solidité et la fluidité.

La fusion du verre, de la cire, du suif, etc., fournissent des exemples de changement dans le second cas; car tous ces corps deviennent progressivement de plus en plus mous, avant d'être entièrement liquides. En général, tous les corps solides qui sont susceptibles de cristalliser ou de prendre la forme prismatique régulière, passent, suivant Thompson, sans intervalle de cet état à celui de fluidité; tandis que ceux qui n'affectent pas ces formes se montrent successivement dans tous les états intermédiaires entre ceux de la solidité et de la liquidité parfaite.

Les corps solides ne commencent jamais à devenir liquides que lorsqu'ils sont chauffés à une certaine température : cette température est déterminée et bien connue pour la classe de ces corps dont le changement d'état se fait sans intervalle; mais quoique à l'égard des autres elle soit également constatée, il n'est pas possible de l'évaluer avec la même précision, à raison du nombre infini de nuances d'amollissement que ces corps éprouvent avant d'arriver à leur plus grand état de fluidité; on peut néanmoins s'assurer que, dans cette dernière espèce de corps, la même température produit toujours le même degré de fluidité.

Les températures auxquelles le changement de la solidité à la fluidité a lieu sont indiquées sous diverses dénominations suivant l'état ordinaire du corps qui l'éprouve. Lorsqu'un corps

est habituellement à l'état liquide, on appelle la température à laquelle il prend la forme d'un *solide*, *son point* ou *son terme de congélation*. Ainsi on donne ce nom à la température à laquelle l'eau arrive à l'état de glace. On désigne par *point* ou *terme de fusion* la température qu'exige un corps ordinairement à l'état solide pour sa liquéfaction.

On verra dans la table suivante les points de fusion de quelques corps solides, avec les noms des observateurs qui les ont déterminés; nous extrayons cette table du *Traité de Physique* de M. Biot.

NOMS DES substances.	TEMPÉRATURE en degrés centésimaux.	NOMS DES observateurs.
Plomb	260°	Biot.
Bismuth	238°	Newton.
Étain.	219	Newton.
	212	Biot.
Étain, huit parties . . . . Bismuth, une partie	200	Newton.
Étain, deux parties . . . . Bismuth, une partie	167,7	
Étain, trois parties. . . . . . . Plomb, deux parties	167,7	
Étain, une partie . . . . Bismuth, une partie.	141,2	
Étain, quatre parties . . . . . . Bismuth, cinq parties. . . . . . Plomb, une partie	118,9	
Étain, trois parties. . . . . . . Bismuth, cinq parties. . . . . . Plomb, deux parties	100	
Soufre.	109	Gay-Lussac.
Cire.	60	Newton.
Cire blanche	68,33	Nicholson.
Suif.	33,33	Thompson.

Dans le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide, par la fusion, il se présente un phénomène très-remarquable.

Exposez du plomb, par exemple, à l'action du feu, et aussitôt qu'il sera fondu entièrement, mesurez-en la température ; vous verrez que cette température augmentera graduellement, en le laissant ainsi en fusion exposé à l'action du feu ; mais si, au moment qu'il est entièrement fondu, vous ajoutez successivement et par parties du nouveau plomb solide, la température du bain n'augmentera pas sensiblement, et quelle que soit la force et l'activité du feu, tant qu'il restera dans le bain du plomb *non fondu*, la température de ce bain sera à peu près la même. Le corps solide exige donc une bien grande quantité de calorique pour passer de cet état à la liquidité, puisqu'une portion de plomb solide suffit pour absorber à elle seule tout le calorique qui passe dans le métal en fusion (1).

Mêlez un kilogramme d'eau *liquide* à o de température avec un autre kilogramme d'eau à 75 degrés centigrades, en laissant de côté l'influence du vase sur ce mélange, vous obtiendrez deux kilogrammes d'eau à 37°,5; le calorique se sera réparti également dans les deux masses ; mais si l'eau est à l'état *solide* le résultat sera bien différent : mettez un kilogramme de neige à o dans un vase aussi à o de température, versez dessus un kilogramme d'eau à 75 degrés, le mélange après la fonte de la neige sera à o de température : l'eau chaude s'est donc refroidie de 75 degrés, et la neige fondue n'a éprouvé aucune augmentation de température. Que sont donc devenus ces 75 degrés de chaleur? Il est évident qu'ils ont passé dans la neige sans y produire d'autre effet que de la fondre, ou de la rendre liquide, de solide qu'elle était. C'est donc à ce changement d'état qu'il faut attribuer cette disparution de calorique,

(1) On se sert quelquefois de ce moyen pour tremper des outils à une température connue et constante.

libre dans l'eau chaude, puisqu'il affectait le thermomètre, et qui, dans l'acte de liquéfaction, s'est tellement caché, combiné dans l'eau, qu'il n'a plus d'action sur le thermomètre. Remarquez bien qu'il est combiné et non perdu; car si ce mélange devenu liquide repassait à l'état de glace, le calorique redeviendrait libre et reparaîtrait.

Nous pouvons donc conclure de ces faits que ce serait une grande erreur de croire qu'un corps solide parvenu au point de se fondre n'exigerait plus que très-peu de calorique pour entrer en fusion. Vous venez de voir que ce changement d'état en consomme, en absorbe beaucoup, puisque la glace à o degré exige 75 degrés de chaleur pour devenir liquide à o degré.

On nomme *latent* le calorique qui se combine et semble disparaître dans le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide; et ce calorique latent redevient libre et reparaît lorsque le corps passe de la liquidité à la solidité.

Ainsi, en général, toutes les fois qu'il y a liquéfaction de corps solides, il y a une quantité plus ou moins grande de calorique libre qui devient latente, et toutes les fois qu'un liquide devient solide, il y a une quantité plus ou moins grande de calorique latent qui devient libre et propre à échauffer tous les corps qui l'entourent.

Tous les corps, avons-nous dit plus haut, se pénètrent de calorique plus ou moins facilement, et le perdent de même par la tendance qu'a ce fluide à se mettre en équilibre dans tous les corps voisins les uns des autres; et il résulte de cette propriété que les corps situés dans un même lieu sont *naturellement* à la même température, c'est-à-dire qu'ils se *montrent* pénétrés de la même quantité de calorique libre. Or, ceci ne veut pas dire qu'ils contiennent tous la même quantité de calorique.

Si au milieu de corps indiquant tous une température, par

exemple, de 20 degrés, vous placez une masse de glace à 0 degré, l'équilibre du calorique sera aussitôt rompu, et il s'échappe de ces divers corps pour se porter sur la glace : celle-ci change d'état et se fond. Or, il peut arriver que l'eau qui provient de cette fonte et que tous les corps environnans arrivent à 0 de température ; l'équilibre du calorique est alors rétabli, et il y a encore dans les limites qui comprennent tous les corps la même quantité de calorique qu'avant l'introduction de la glace ; mais le calorique est devenu latent, et il n'aurait plus d'influence extérieure comme calorique, que lorsqu'on placerait au milieu de ces corps à 0 de température commune, quelque autre corps plus froid encore, à 10 ou 20 degrés audessous de zéro, par exemple. Celui-ci, par sa présence, tendrait à faire repasser l'eau à l'état de glace, et par conséquent à convertir le calorique latent en calorique libre ; malgré cela la température de tout le système de corps peut descendre audessous de 0.

Mais tous ces corps en présence contenaient-ils la même quantité de calorique lorsqu'ils étaient à 20 degrés ? et pour arriver à 0 par l'influence de la glace, ont-ils perdu tout le calorique dont ils étaient pénétrés ? D'abord nous voyons dans cet exemple, 1°. que la glace à 0 contient beaucoup moins de calorique que la glace fondue qui marque encore 0 après avoir absorbé les 20 degrés de chaleur que possédaient les corps sur lesquels on lui a fait exercer son influence ; il est donc évident qu'il suffit d'un changement d'état pour qu'un corps contienne des quantités de chaleur différentes, quoique marquant la même température ; 2°. que ces corps, après avoir perdu les 20 degrés de chaleur, en contenaient encore, puisqu'ils ont pu se refroidir encore audessous de 0.

Ensuite, si les corps de même nature qui changent d'état

contiennent, bien qu'à la même température, des quantités différentes de calorique, on peut se demander si des corps de nature différente, élevés à la même température, sans les changer d'état, sont pénétrés des mêmes doses de chaleur, et quelles sont les quantités absolues qu'ils possèdent à un certain degré de température.

L'expérience montre sur le premier point que chaque corps, d'après sa nature, est combiné avec une dose déterminée de calorique qu'on appelle *calorique spécifique*, et que les corps de nature différente, pour descendre d'un certain degré de température au-dessus de zéro à o degré, fournissent des quantités inégales de chaleur.

Quant au second point, il paraît que c'est en vain qu'on a cherché jusqu'à présent à connaître les quantités absolues de calorique des corps; on ne connaît que des rapports, c'est-à-dire qu'on sait que tel corps est plus chaud, qu'il contient plus de calorique libre que tel autre; et c'est, comme nous venons de le dire, la quantité affectée à chaque nature de corps et à chaque changement d'état qu'on a désignée sous le nom de calorique spécifique. L'on nomme aussi *capacité des corps* pour le calorique, la faculté qu'ils ont d'en recéler différentes doses.

Pour connaître les rapports qui existent entre les quantités de calorique spécifique affectées à chaque corps, on se sert d'un moyen très-simple : on porte le corps qu'on veut essayer à un certain degré de température; on le place ensuite dans des circonstances telles qu'il puisse céder le calorique qui l'affecte, et passer à o de température en produisant sur un corps d'une température fixe un effet *calorifiant* susceptible de mesure. Plus cet effet sera grand, plus le corps sera réputé avoir de calorique spécifique, et réciproquement.

Ainsi l'on sait, par exemple, qu'un kilogramme de glace

à o exige un kilogramme d'eau à 75 degrés centigrades pour se fondre, et que le mélange est encore à o de température. Or, si l'on prend un kilogramme d'un autre corps que l'eau pour faire fondre le même poids de glace à o, et qu'on l'échauffe aussi à 75 degrés, il arrivera de trois choses l'une : ou il ne fondra pas tout le kilogramme de glace, et alors on dira qu'il ne contient pas autant de calorique spécifique que l'eau, ou il fondra ce kilogramme et le tout marquera o de température, ce qui prouvera que ce corps contient autant de calorique que l'eau, ou enfin il sera capable de fondre plus d'un kilogramme de glace, ou bien d'élever au-dessus de o l'eau provenue de la fonte du kilogramme de glace, et l'on dira que ce corps a plus de calorique spécifique que l'eau.

Si donc ce corps ne fond qu'un demi, qu'un quart de kilogramme de glace, on que pour en fondre un kilogramme, il faille deux ou quatre kilogrammes de ce corps élevé à 75 degrés, il est évident qu'il ne contient que la moitié ou le quart du calorique spécifique de l'eau, et réciproquement.

On a donc trouvé très-commode de prendre la glace fondante qui marque toujours o de température, comme terme de comparaison, et pour simplifier l'expression des rapports du calorique spécifique affectée à divers corps avec celui de l'eau; on a désigné par *l'unité* le calorique spécifique de l'eau, et l'on a dressé, d'après les expériences de divers auteurs, la table suivante qui donne le calorique spécifique d'un certain nombre de corps comparés à l'eau sous ce rapport. (*Voy. Chimie de Thompson.*)

NOMS des substances.	CALORIQUE spécifique relatif.	NOMS des auteurs.
Eau commune	1,0000	
Glace	0,9000	Kirwan.
Soufre	0,2085	Lavoisier et Laplace.
Fer battu	0,1100	*Les mêmes*
Cuivre	0,1111	Crawford.
Métal des canons	0,1100	Rumford.
Zinc	0,0943	Crawford.
	0,1020	Wilcke.
Argent	0,0820	Wilcke.
Étain	0,0475	Lavoisier et Laplace.
Antimoine	0,0645	Crawford.
Or	0,0500	Wilcke.
Plomb	0,0282	Lavoisier et Laplace.
Mercure	0,0290	*Les mêmes.*
Bismuth	0,0430	Wilcke.
Oxide jaune de plomb	0,0680	Crawford.
	0,0680	Kirwan.
Oxide de zinc	0,1369	Crawford.
Oxide de cuivre	0,2272	*Le même.*
Chaux vive	0,2169	Lavoisier et Laplace.
Verre sans plomb	0,1929	*Les mêmes.*
Acide nitrique pesant spécifiquement 1,2989	0,6614	*Les mêmes.*
	0,6200	Leslie.
Acide sulfurique 1,872	0,3400	*Le même.*
Acide sulfurique 1,870	0,3346	Lavoisier et Laplace.
Acide sulfurique, quatre parties. Eau, cinq parties	0,6031	*Les mêmes.*
Sel marin, une partie. Eau, huit parties.	0,8320	Crawford.
Nitre, une partie. Eau, huit parties	0,8187	Lavoisier et Laplace.
Esprit-de-vin rectifié, ou alcohol	0,6400	Leslie.
Huile d'olive	0,5000	*Le même.*
Huile de lin	0,5280	Kirwan.
Huile de térébenthine	0,4720	*Le même.*
Huile de baleine	0,5000	Crawford.

Nous ne nous attacherons pas à montrer comment on est parvenu à former cette table ; nous ne pouvons mieux faire que de renvoyer aux traités modernes de physique et de chimie. Nous remarquerons cependant, 1°. que l'eau est de tous les

corps compris dans cette table, celui qui a le plus de calorique spécifique.

2°. Que le nombre qui correspond à chacun de ces corps; le nombre 0,110 au fer battu, par exemple, indique qu'un poids donné de ce métal qui *se refroidit d'un degré* abandonne une quantité de calorique suffisante pour élever de 0°,110 la température d'un poids égal d'eau; qu'un poids donné d'étain échaufferait de 0°,0475 un poids égal d'eau; d'où il suit que pour élever de 1 *degré* la température du fer battu, il ne faut que les $\frac{110}{1000}$ de la quantité de calorique qu'exigerait une masse d'eau du même poids que le fer.

3°. Que pour connaître de combien la température d'un de ces corps serait élevée par un des autres qui se refroidirait de 1 *degré*, il faut diviser le nombre qui exprime la chaleur spécifique de celui-ci, par le nombre qui exprime celle de l'autre; le quotient donnera la valeur de l'augmentation de température. Ainsi pour savoir de combien une masse de fer battu, qui se refroidirait d'un degré, élèverait la température d'un poids égal d'étain, il faut diviser 0,1100 par 0,0475; le quotient exprimera cette valeur quelle que soit l'échelle dont on se serve, attendu qu'elle est la même pour les deux termes du rapport.

4°. Enfin si l'on multiplie, dit M. Biot, les nombres de cette table par $\frac{1}{60}$ qui exprime la chaleur spécifique absolue de l'eau en degrés de Réaumur (*Voy. éclaircissemens et développemens*, *article* 1.), on aura le poids de la quantité de glace qu'un poids 1 de ces substances peut fondre en se refroidissant d'un degré de cette même division; que si l'on faisait la multiplication par $\frac{1}{75}$ ou $\frac{4}{300}$, on aurait le résultat analogue pour un degré centisimal. On trouverait ainsi la chaleur spécifique *absolue* des substances désignées dans la table précédente.

Maintenant si nous récapitulons les faits principaux qui se

sont présentés dans l'examen que nous venons de faire de l'action de la chaleur sur les corps solides et des phénomènes qu'elle produit, nous trouvons, 1°. que tous les corps solides sont pénétrables à la chaleur, sans l'être au même degré; que tous jouissent de la faculté de la conduire, de la transmettre, mais que cette faculté varie pour chaque corps.

2°. Qu'un corps pénétré de chaleur la perd par le contact et par le rayonnement, que l'état de la surface des corps et la pression du milieu environnant influent beaucoup sur la promptitude avec laquelle cette perte se fait, comme l'état de cette surface influe sur la facilité plus ou moins grande qu'ils ont de recevoir de la chaleur par voie de rayonnement, ou à distance.

3°. Que le calorique une fois arrivé dans un corps, tend de lui-même à en sortir pour établir l'équilibre de température qui finit par avoir lieu dans les corps compris dans un certain espace.

4°. Que les corps solides se dilatent en général par la chaleur, mais inégalement, suivant leur nature et même suivant le degré de température pour un même corps; qu'ils passent de l'état solide à l'état liquide avec des quantités différentes de calorique.

5°. Que dans ce changement d'état, une partie de calorique se combinant avec le corps, n'est plus sensible au thermomètre et devient *latente;* que cette portion de calorique peut reparaître lorsque le liquide repasse à l'état solide; qu'une masse de glace à o de température exige un poids égal d'eau échauffée à 75 degrés centigrades pour se fondre, et que le mélange liquide qui en résulte est à o de température; d'où il suit que pour produire ce changement d'état il a fallu 75 degrés de chaleur qui est devenue latente.

6°. Que pendant le temps que dure la fusion du corps solide,

pendant le temps qu'il change d'état, sa température n'augmente pas, bien qu'il reçoive de nouvelles quantités de chaleur ; tout ce qu'il reçoit devient latent et disparaît pour les mesures thermométriques ; ce n'est que lorsque le changement d'état est entièrement opéré que la température commence à s'élever si le feu est continué.

7°. Enfin que les corps, bien qu'à la même température, ne possèdent point les mêmes doses de calorique ; qu'une certaine quantité est affectée à chaque corps suivant sa nature et selon les changemens d'état qu'il éprouve, et qu'on appelle cette quantité affectée à chaque corps *calorique spécifique ;* d'où il suit que pour élever un corps à une température déterminée, il ne faut pas la même dose de calorique que pour un autre corps ; qu'il en faut plus à un corps qui, par sa nature, a beaucoup de calorique spécifique, ou, si l'on veut, de capacité pour le calorique qu'à un corps qui en a moins ; qu'ainsi il faut moins de chaleur pour échauffer de l'étain à 100 degrés, par exemple, que pour échauffer le cuivre ou le fer battu.

CHAPITRE XXXVI.

Suite du même sujet.

Troisième question. *Quelle est l'action de la chaleur sur les liquides et principalement quels sont les phénomènes que présente l'eau dans ses relations avec la chaleur ?*

La table que nous avons donnée précédemment du calorique spécifique de divers corps, nous montre qu'en général les li-

quides en contiennent plus que les solides : c'est très-probablement à cette combinaison de calorique en assez grande quantité que les premiers doivent cette mobilité de molécules qui les constitue liquides. Le calorique étant comme interposé entre ces molécules, les écarte assez les unes des autres pour détruire en partie la force de cohésion qui tient unies les molécules d'un corps solide, et celles même d'un liquide congelé : les molécules de l'eau ont une très-faible cohésion entre elles : les molécules de la glace en ont relativement une très-forte.

L'état de liquidité suffit seul pour modifier l'action de la chaleur sur les corps qui sont dans cet état.

Une barre de fer que vous exposez par un bout à l'action du feu, conduit le calorique de molécule à molécule, et il faut, comme nous l'avons vu, un certain temps pour que ce fluide puisse pénétrer d'une extrémité à l'autre de cette barre de fer; le calorique qui agit sur les premières molécules, tend bien à les écarter, mais il ne peut les déplacer, et seul il semble traverser les petits passages qu'il s'est ouverts entre les molécules des corps solides.

Ce n'est pas ainsi qu'en général le calorique échauffe un liquide : les molécules de la première couche liquide qui touche la paroi du vase exposée à l'action du feu, se dilatant aux premières impressions de chaleur, et devenant ainsi plus légères que les autres molécules, s'élèvent dans le sein du liquide, et viennent se ranger en nappe à la surface. Le calorique ne passe pas d'une molécule à l'autre, il est comme transporté par les molécules sur lesquelles il a exercé son action. Mais si les molécules affectées de calorique s'élèvent, comme plus légères, les autres prennent leurs places pour s'échauffer à leur tour; un vase rempli de liquide doit donc alors présenter deux courans, l'un *ascendant* et l'autre *descendant ;* le

premier transporte le calorique du fond à la surface du liquide, le second va le recevoir à sa source. On rend sensible ce double mouvement des molécules liquides qui s'échauffent dans un vase dont le fond est exposé immédiatement à l'action du feu, en mêlant au liquide des particules légères, solides, colorées : on voit les unes descendre, les autres monter, et mettre ainsi en évidence la manière dont s'opère la propagation du calorique dans les corps liquides.

Il paraît cependant que la chaleur peut se propager encore dans les liquides par communication immédiate, mais ce mode en comparaison de l'autre est extrêmement peu efficace.

On le prouve en échauffant une masse liquide par sa partie supérieure, ou en le refroidissant par sa partie inférieure. Dans le premier cas les particules que l'on échauffe devenant plus légères ne peuvent pas descendre; dans le second cas, les particules refroidies étant plus lourdes ne peuvent pas monter.

Pour la première expérience on prend un vase de verre ou de toute autre matière qui propage lentement la chaleur; on adapte à ce vase, deux thermomètres, de telle manière que l'un indique la température du liquide qui est au fond, et l'autre celle des couches supérieures; versez alors assez de liquide froid, assez d'eau, par exemple, dans la partie inférieure du vase pour recouvrir entièrement la boule du thermomètre qui y correspond; puis après avoir fait flotter sur cette eau une petite rondelle de bois très-mince, versez-y doucement de l'eau bouillante avec toutes les précautions nécessaires pour ne pas mêler l'eau chaude à l'eau froide; vous aurez ainsi deux couches liquides superposées, de température très-différentes. Cependant le thermomètre inférieur ne s'échauffera pas sensiblement, du moins dans les premiers instans de l'expérience. Rumford qui, le premier, a imaginé ce genre

d'expérience, et qui en a varié l'application de mille manières, prétend que le thermomètre inférieur ne varie point, quelle que soit la durée de l'expérience, et il en conclut que les liquides sont absolument incapables de transmettre la chaleur par communication.

M. Dalton, qui s'est beaucoup occupé du même objet, trouve, au contraire, qu'au bout d'un certain temps, ce thermomètre s'élève, et il en infère qu'à la vérité les liquides s'échauffent principalement par les courans ascendans quand ils sont libres de le faire, mais que cependant ils transmettent aussi la chaleur par communication directe quoique avec une facilité incomparablement moindre.

M. Dalton, dans une de ses expériences, a employé pour la couche plus froide, du mercure au lieu d'eau; les résultats ont été semblables : le thermomètre inférieur s'est élevé lentement. Cependant on ne pouvait pas alors supposer des causes d'ondulations intérieures qui eussent fait descendre l'eau dans le mercure, ou monter le mercure dans l'eau. On ne peut pas non plus supposer que la transmission de la température se soit faite par le moyen des parois du vase qui était de verre; car si l'on prend une tige de verre seulement d'un décimètre de longueur, et qu'on tienne l'une de ses extrémités pendant plus d'une heure à la température de l'eau bouillante, l'autre extrémité ne sera pas seulement élevée au bout de ce temps de $\frac{1}{10}$ de degrés, tant le verre transmet mal la chaleur.

On peut faire cette expérience d'une autre manière : après avoir versé dans la partie inférieure du vase, de l'eau ou du mercure, versez par-dessus de l'alcohol à la même température, et, après avoir vérifié que les deux thermomètres marquent le même degré, mettez le feu à cet alcohol; la chaleur se transmet si difficilement par communication immédiate de la couche

supérieure qui brûle à la couche inférieure, que le thermomètre placé dans celle-ci ne monte que très-lentement.

Pour faire l'expérience inverse qui consiste à refroidir la couche supérieure, par communication, placez au fond du vase ci-dessus un morceau de glace, recouvert d'une couche d'eau liquide à o de température, et versez doucement par-dessus une couche d'eau chaude; la glace ne refroidit qu'à peine et très-lentement la couche d'eau chaude qui est au-dessus, et la glace ne se fond qu'avec une extrême lenteur. (*Voy. Traité de Physique de M. Biot.*)

Il résulte de ces expériences que, comme nous l'avons dit plus haut, la portion de calorique qui, dans les liquides, se propage d'une molécule à l'autre, par communication immédiate, est extrêmement petite en comparaison de celle qui s'élève avec les molécules échauffées au fond d'un vase. On peut conclure dès lors, 1°. que pour échauffer promptement une masse liquide, ce n'est ni à la partie supérieure de cette masse, ni à une des faces latérales du vase qui la contient, qu'il faut porter l'action de la chaleur, mais bien sous le fond, et sur tous les points correspondans verticalement avec ceux de la surface liquide, afin de multiplier et de répandre dans toute la masse les courans ascendans.

2°. Que pour échauffer le plus promptement possible une masse donnée de liquide, il faut lui faire présenter à l'action du feu la plus grande étendue de surface possible, afin de multiplier les points de contact immédiat des molécules liquides avec le foyer ou la source d'où le calorique émane; ce qui revient à dire qu'il faut donner à une chaudière, par exemple, le plus de largeur et de longueur possible et une très-petite hauteur relative.

Le mode de propagation du calorique dans les liquides, n'est

pas le seul phénomène qui doive appeler notre attention; il s'agit de savoir maintenant ce qui arrive lorsqu'on laisse une masse liquide exposée à l'action du feu.

Aux premières impressions de la chaleur sur les molécules d'eau, celles-ci se dilatent, comme nous l'avons dit, et viennent occuper la partie supérieure du liquide, tandis que les couches plus froides viennent à leur tour s'échauffer. Lorsque la température de toute la masse est arrivée à un certain degré d'élévation les molécules qui touchent le fond du vase, et qui là sont d'ordinaire le plus immédiatement en contact avec le calorique, se forment en petites bulles et tendent à se soulever; mais comme les couches supérieures s'y opposent aussi long-temps que la température de la masse liquide n'est pas encore assez élevée pour maintenir l'état élastique que ces bulles ont pris : elles sont comme étouffées, et le liquide un instant soulevé, retombe sur le fond; on entend alors un petit bruit qui accompagne une sorte de trémoussement qu'éprouve le liquide, et qui précède l'ébullition de quelques instans. La température de la masse totale continue de s'élever, et lorsqu'elle est arrivée au point de ne plus détruire l'élasticité des bulles qui viennent du fond, le bruit cesse, l'ébullition a lieu, et des portions successives du liquide changent d'état, tant que dure l'ébullition. La masse de ce liquide finit ainsi par passer toute entière à l'état de vapeur, laquelle ressemble alors à un fluide aériforme.

Un phénomène remarquable se présente dans l'ébullition. Aussitôt qu'un liquide bout, sa température ne s'élève plus, elle reste au même point pour chaque espèce de liquide, quelles que soient et l'ardeur du feu, et la violence de l'ébullition; qu'elle soit lente ou vive, tout le calorique que le liquide reçoit est uniquement employé à opérer le changement d'état, à réduire à chaque instant en vapeur, des portions plus ou

moins grandes de liquide. Or ce calorique devient latent, et la vapeur, qui se l'approprie en se formant, est à la même température que le liquide bouillant. L'on peut se convaincre de ce fait en plaçant un thermomètre dans l'eau d'une chaudière à moitié remplie, et un autre thermomètre dans la partie vide de cette chaudière. Lorsque l'ébullition a lieu, cette dernière partie se remplit de vapeur, et les deux thermomètres marquent le même degré de température.

La quantité de calorique qui devient latente dans le passage de l'état liquide à l'état de vapeur ou de gaz, est très-considérable; cette quantité diffère suivant la nature du liquide : l'eau, par exemple, rend latent 4^fois^ 66 autant de calorique qu'elle en exige pour passer de o liquide à 100 degrés centigrades, d'après les expériences de MM. Clément et Desormes. D'où il résulte qu'un kilogramme de vapeur suffit pour porter à 100 degrés de température, 4^kil^,66 d'eau à o degré, à travers laquelle on ferait passer cette vapeur, et qu'on aurait ainsi 5^kil^,66 d'eau à 100 degrés si l'on ne perdait point de chaleur.

Cette grande quantité de calorique qu'exige le changement d'état du liquide, explique pourquoi sa température n'augmente pas pendant la durée de l'ébullition : la vapeur emporte tout le calorique qui émane du foyer en combustion, et le liquide n'est plus qu'un intermédiaire par lequel ce fluide passe sans s'y arrêter.

Chaque liquide, suivant sa nature, a particulièrement un point déterminé auquel, toutes choses égales d'ailleurs, il commence à bouillir, et ce point s'appelle celui de son ébullition. Ainsi l'eau, à l'air libre, commence à bouillir lorsqu'elle est arrivée à la température de 100 degrés centigrades; cependant son ébullition est retardée lorsqu'elle tient en dissolution quelques corps moins volatils qu'elle ne l'est; l'eau salée ou

sucrée, par exemple, ne bout qu'à une température de plus de 100 degrés.

Au surplus, quel que soit le point d'ébullition d'un liquide, il ne s'échauffe jamais davantage, nous le répétons, à quelque forte chaleur qu'il soit exposé : l'action continue du calorique n'a d'autre effet que de donner à l'ébullition plus de rapidité, et de fournir, dans un temps donné, une plus grande quantité de vapeur.

La table suivante indique le point particulier d'ébullition de quelques liquides, et de quelques corps qui deviennent liquides entre 100 et 200 degrés centigrades.

NOMS des substances.	POINT d'ébullition.
Éther	36°,66 centigrades.
Ammoniaque	60°
Alcohol	80°
Eau.	100°
Muriate de chaux	110°,11
Acide nitrique.	120°
Carbonate de potasse	126°,66
Acide sulfurique.	210°
Phosphore.	290°
Huile de térébenthine.	293°,33
Soufre.	298°,88
Huile de lin.	315°,55
Mercure.	348°,88

(*Voy. Chimie de Thompson.*)

Lorsque les liquides reçoivent l'action de la chaleur, ils se dilatent plus ou moins, suivant leur nature, avant d'arriver au point d'ébullition; mais leur dilatation n'est pas proportionnelle aux quantités de chaleur qu'ils reçoivent; c'est-à-dire qu'entre 10 et 20 degrés la dilatation est autre, avec la même quantité de chaleur, qu'entre 30 et 40 degrés, par exemple. Ce phé-

nomène digne de remarque paraît provenir, suivant M. Thompson, de l'affinité ou de la volatilité des parties composantes de ces corps ; car en général ceux dont l'ébullition a lieu aux températures les plus basses, ou qui contiennent quelque principe susceptible de prendre facilement la forme gazeuse, sont aussi ceux qui se dilatent le plus par l'addition d'une quantité donnée de calorique. Ainsi, par une même augmentation de température, le mercure se dilate beaucoup moins que l'eau, qui entre en ébullition à une température inférieure à celle qu'exige le mercure; et par la même raison, la dilatation de l'alcohol est beaucoup plus considérable que celle de l'eau. L'acide nitrique se dilate également beaucoup plus que l'acide sulfurique, non-seulement puisqu'il entre en ébullition à une température moins élevée, mais encore parce qu'une portion de cet acide a de la tendance à prendre la forme d'un fluide élastique. Cette règle de la dilatation du liquide est au moins celle que j'ai reconnue, dit M. Thompson, dans tous ceux que j'ai jusqu'ici examinés sous ce rapport ; et j'en conclus qu'on peut considérer comme un fait assez général que la dilatation des liquides est à peu près en raison inverse de leur température d'ébullition.

Une autre circonstance, relative à la dilatation des liquides, mérite une attention particulière : l'expansibilité de chacun d'eux semble augmenter avec la température, ou, en d'autres termes, plus un liquide est voisin de son point d'ébullition, et plus grande est la dilatation qu'il éprouve par l'addition d'un degré de calorique; et d'un autre côté, plus la température d'un liquide s'éloigne de celle à laquelle il commence à bouillir, et plus l'augmentation produite dans son volume, par l'addition d'un degré de calorique, est moindre ; il en résulte que la dilatation des liquides augmente d'autant plus lentement que le terme de leur ébullition est plus élevé.

La densité n'influe d'aucune manière sur leur faculté de dilatation; celle-ci dépend de la quantité de calorique qui leur est nécessaire pour les amener à l'état d'ébullition et les convertir en fluides élastiques. Nous ignorons, poursuit l'auteur cité ci-dessus, pourquoi le changement d'état exige dans différens liquides des températures diverses.

Les deux tables suivantes dont la première est puisée dans le 1[er] vol. des *Annales de Chimie et de Physique*, et la seconde dans *l'ouvrage cité de Thompson*, feront voir l'effet et la marche de la dilatation dans différens liquides.

PREMIÈRE TABLE.

Dilatation, en volume, *des liquides entre* 0 *et* 100 *degrés centigrades*.

Acide muriatique.	0,0600 = $\frac{1}{17}$.	Dalton.
— nitrique.	0,1100 = $\frac{1}{9}$.	*id.*
— sulfurique	0,0600 = $\frac{1}{17}$.	*id.*
Alcohol	0,1100 = $\frac{1}{9}$.	*id.*
Eau	0,0466 = $\frac{1}{21}$.	*id.*
Eau saturée de sel marin.	0,0500 = $\frac{1}{20}$.	*id.*
Éther.	0,0700 = $\frac{1}{14}$.	*id.*
Huiles fines.	0,0800 = $\frac{1}{12}$.	*id.*
Huile de térébenthine.	0,0700 = $\frac{1}{14}$.	*id.*
Mercure	0,0200 = $\frac{1}{50}$.	*id.*
Mercure	0,01872 = $\frac{1}{53}$.	Cavendish.

DEUXIÈME TABLE.

Températures.	Mercure.	Huile de lin.	Acide sulfurique.	Acide nitrique.	Eau.	Huile de térébenthine.	Alcohol.
0° cent.	100000	100000					100000
4°44	100081		99752	99514			100539
10°	100183		100000	100000	100023	100000	101105
15°55	100304		100279	100486	100091	100460	101688
21°11	100405		100558	100990	100197	100993	102281
26°66	100508		100806	101530	100332	101471	102890
32°22	100610		101054	102088	100694	101931	103517
37°77	100712	102760	101317	102620	100908	102446	104162
43°33	100813		101540	103196		102948	
48°88	100915		101834	103776	101404	103421	
54°44	101017		102097	104352		103954	
60°00	101119		102320	105132		104573	
65°55	101220		102614		102017		
71°11	101322		102893				
76°66	101424		103116				
82°22	101526		103339				
87°77	101628		103587		103617		
93°33	101730		103911				
100°00	101885	107250			104577		

Toute dilatation cesse lorsque le liquide parvient à l'ébullition; le calorique qui pénètre alors n'a plus d'autre effet que de changer l'état du corps, ainsi que nous l'avons vu plus haut; il faut dire toutefois qu'il en est une petite partie qui s'échappe par les parois du vase où le liquide bout.

Quelle que soit la température d'un liquide, le calorique dont il est pénétré ou qu'il reçoit par irradiation des corps voisins, tend constamment à s'échapper, et il s'en échappe en effet, emportant avec lui des petites portions de liquide qu'il réduit successivement en vapeur. C'est pour cela que l'eau d'un vase laissé à l'air, pendant un certain temps, se vaporise à toute température et finit par se dissiper entièrement. L'action ex-

presse d'un feu artificiel n'est donc pas indispensable pour convertir un liquide en vapeur; seulement la vaporisation qui se fait spontanément à l'air libre est très-lente, et d'autant plus lente que la température du lieu où le liquide se trouve, est plus basse; tandis que la vaporisation forcée par le contact du feu, qu'on nomme plus particulièrement *évaporation*, est d'autant plus prompte que l'affluence du calorique dans le liquide est plus considérable. Nous supposons toujours ici que le liquide est exposé à l'air libre.

Puisqu'un liquide se vaporise spontanément, par la tendance du calorique à se combiner en assez grande proportion avec les molécules de ce liquide, pour en faire de la vapeur, il suit évidemment que la température de ce corps tend à s'abaisser, et qu'elle s'abaisserait en effet, si le vase qui contient le liquide ne recevait pas des corps voisins, par voie de rayonnement, ou, par contact, le calorique nécessaire au maintien de sa température, et à la formation de vapeur qui a lieu sans interruption. La quantité de calorique, qui devient latente par ce changement d'état continuel, explique le pouvoir rafraîchissant d'une masse d'eau, dans un lieu quelconque, ou la sensation de froid qu'on éprouve lorsqu'on a les mains mouillées d'eau, et encore mieux d'alcohol ou d'éther, comme plus volatils, qu'on laisse se vaporiser spontanément.

Mais pour que ces vapeurs se forment, soit spontanément à divers degrés de température, soit artificiellement par l'action du feu, il faut qu'aucun obstacle ne vienne s'opposer à leur expansion, à leur dispersion.

Il y a bien un obstacle naturel, imminent que rencontre toujours la vaporisation spontanée et l'évaporation, c'est la pression de l'air atmosphérique. Il est certain que sur une surface liquide d'un mètre carré, par exemple, il y a une pression

équivalente à une colonne de mercure d'un mètre carré de base et de 76 centimètres de hauteur; pression énorme, que la vapeur doit vaincre pour sortir en abondance du sein du liquide. Or ce n'est point dans la vaporisation spontanée, à une température au-dessous de l'ébullition, que la vapeur a une force suffisante; et si, dans le fait, elle s'échappe du liquide, on ne peut pas dire pour cela qu'elle soulève la colonne atmosphérique; mais bien que par l'agitation, par les petits mouvemens, plus ou moins sensibles, des couches d'air qui touchent le liquide, la vapeur qui paraît à chaque instant à la surface de celui-ci, est entraînée et se mêle à l'air environnant, sans forcer la pression atmosphérique. Ceci est tellement vrai, que plus l'air est agité autour du liquide, plus la vaporisation est active; et que, si par la pensée on supposait que la colonne atmosphérique correspondante à la surface d'un liquide prenait tout à coup le caractère d'un corps solide, il n'y aurait plus de vaporisation spontanée : il faudrait porter le liquide à une pleine ébullition pour que la vapeur eût la force de soulever la pression de l'air ainsi métamorphosé; c'est évidemment ce qui arriverait, si l'on portait l'eau à 100 degrés de température, qui, comme on sait, est le terme de son ébullition; terme auquel il faut se rappeler que la vapeur a pris assez de force pour vaincre cet obstacle, et pour s'élancer du liquide sans autre concours que sa propre force.

On conçoit dès lors que la force avec laquelle la vapeur s'échappe, dépend entièrement de la pression extérieure que la surface du liquide éprouve, et, soit dit en passant, quand il survient des variations dans la pression de l'atmosphère, l'eau bout dans le même lieu à divers degrés de température; en bouillant sur le haut d'une montagne, elle n'a pas la même chaleur que dans quelque autre lieu au niveau des mers.

Lorsqu'un vase complétement rempli d'eau est fermé hermétiquement et de manière à empêcher toute évaporation, la vapeur ne peut se former, et le calorique s'accumule dans la masse liquide, sans changer l'état de celui-ci, et par conséquent sans devenir calorique latent. Il en résulte que ce liquide peut s'échauffer à un très-haut degré sans bouillir : si, par exemple, vous remplissez une chaudière petite et d'une très-grande solidité, et que vous la fermiez bien exactement par un couvercle fortement boulonné sur la chaudière, ou assujetti par quelque autre moyen équivalent, quel que soit le feu auquel vous exposiez cette petite chaudière, qu'on appelle communément *marmite de Papin*, l'eau n'y bouillira pas, bien qu'elle acquière assez de chaleur pour fondre du plomb et même pour rougir.

A ce haut degré de température, la masse d'eau renfermée dans la marmite peut receler une quantité de calorique suffisante pour la réduire toute entière en vapeur, si un obstacle assez puissant n'en empêchait la formation : vous concevez parfaitement que si l'on venait à découvrir cette marmite, tout le liquide dans cette supposition passerait subitement et avec une extrême violence à l'état de vapeur; et ce ne serait assurément pas sans un grand danger pour celui qui hasarderait une pareille manœuvre.

Ce ne serait pas sans un très-grand danger non plus qu'on laisserait trop long-temps exposé un vase de cette espèce à un feu ardent. L'eau, quoique liquide, exerce une très-grande pression sur les parois du vase lorsqu'elle est pénétrée d'une quantité suffisante de calorique pour être réduite en vapeur, en tout ou en partie : les molécules fortement pressées les unes contre les autres par la dilatation ont une tendance explosive dont les limites ne sont peut-être pas assignables, et qui est

extrêmement à redouter; cette tendance se montre même déjà avec assez d'énergie au point d'ébullition à l'air libre, et elle croît très-rapidement avec la force de l'obstacle qui s'oppose à la formation ou à la dispersion de la vapeur. C'est pourquoi il serait d'une très-haute imprudence de donner de grandes dimensions à une marmite de Papin; c'est pourquoi aussi il faut donner tant de solidité à une chaudière destinée à fournir de la vapeur dont la force soit non-seulement suffisante pour vaincre la pression naturelle de l'atmosphère; mais encore pour exécuter en même temps un travail d'une certaine résistance, comme nous l'avons vu précédemment dans nos premiers appareils à vapeur.

Quand l'eau bout dans une chaudière appliquée à un appareil de ce genre, elle est à une température plus élevée que 100 degrés centigrades, et d'autant plus élevée que le piston, qui n'est au fond qu'un couvercle mobile, est plus chargé par la résistance du travail. Chaque portion de vapeur qui s'échappe, a la même température que le liquide qui l'a formée, et elle emporte avec elle, comme nous l'avons dit ci-dessus, des quantités telles de calorique latent, que la température du liquide baisserait promptement, s'il ne réparait pas à chaque instant ses pertes par l'action du foyer comburant.

Si l'eau bout à 100 degrés centigrades sous la pression atmosphérique; si elle ne bout qu'à une plus haute température sous une pression plus grande, exercée, par exemple, par un piston mobile, elle bout aussi au-dessous de 100 degrés lorsque la pression qu'elle éprouve est au-dessous de celle de l'atmosphère.

Placez sous le récipient d'une machine pneumatique, qui est, comme vous savez, une pompe au moyen de laquelle on fait le vide dans ce récipient; placez-y, disons-nous, un vase

contenant de l'eau, échauffée seulement à 40 degrés ; après quelques coups de piston, c'est-à-dire après avoir diminué d'une certaine quantité la pression atmosphérique, cette eau entrera dans une vive ébullition; il y a plus, si vous pouviez obtenir un vide parfait, en vous emparant de tout l'air que renfermait le récipient, et de la vapeur qui s'y formerait, l'eau bouillirait à o degré de température; c'est-à-dire que le calorique latent, uni à toutes les molécules liquides à o, se rassemblerait sur quelques-unes seulement pour les réduire en vapeur, lorsque toute pression extérieure aurait été écartée. Les molécules, étant ainsi comme abandonnées, doivent donc se refroidir considérablement; c'est ce qui arrive en effet, car l'eau dans cette circonstance après avoir produit une certaine quantité de vapeur, aussitôt absorbée que formée, et n'ayant plus une dose de calorique suffisante pour rester à l'état liquide, passe à celui de glace, même en été. On voit dans les traités modernes de physique et de chimie la manière de faire cette expérience.

On conçoit bien que, si le vase qui contient l'eau recevait assez promptement, des corps voisins, le calorique qui s'échappe avec la vapeur, l'effet de refroidissement que nous venons de signaler n'aurait point lieu, et l'évaporation serait plus prompte par ce renouvellement continuel de calorique.

C'est ce qui se passe lorsqu'on fait évaporer l'eau d'une chaudière de la surface de laquelle on écarte la pression atmosphérique; en faisant un vide partiel avec une pompe pneumatique, l'eau continue de bouillir au-dessous de 100 degrés comme au-dessus. Des quantités égales de calorique passent dans l'eau pour former dans les deux cas, les mêmes poids de vapeur; mais lorsque le vide partiel existe, qu'il y a peu de pression au-dessus d'un liquide exposé à la chaleur, le calorique, au lieu de s'accumuler dans la masse liquide sous une

apparence sensible, prend, à mesure qu'il arrive, l'état latent; c'est ce qui fait que cette masse est moins chaude que sous la pression naturelle de l'atmosphère.

Il résulte de ce que nous venons de dire que le terme de l'ébullition de l'eau peut être rapproché ou reculé; rapproché en diminuant la pression, reculé en l'augmentant. Dans le premier cas le calorique ne fait, pour ainsi dire, que traverser le liquide et former incontinent de la vapeur; dans le second, il y est retenu pendant quelque temps par la pression extérieure, et il ne s'échappe grandement qu'après avoir donné à la vapeur la force nécessaire pour vaincre la pression qui lui est opposée.

Ajoutons à ce que nous venons de dire sur les phénomènes des liquides, en rapport avec le calorique, que ces corps contiennent tous certaines quantités d'air atmosphérique avec lesquelles ils sont combinés de telle manière, que par le vide même on a bien de la peine à les en dépouiller; il faut quelque temps d'ébullition pour en opérer le dégagement. Ce mélange de l'air influe nécessairement sur la marche des dilatations des liquides et sur la qualité de la vapeur qu'ils produisent; c'est une circonstance qu'il ne faut pas perdre de vue dans le sujet qui nous occupe.

En récapitulant les faits principaux qui se sont présentés dans l'étude de l'action du calorique sur les liquides, nous avons trouvé, 1°. que le calorique se propage dans les liquides par des courans ascendans, et très-faiblement par communication immédiate.

2°. Que les liquides, suivant leur nature, se dilatent par la chaleur et d'autant plus qu'ils s'approchent de leur terme respectif d'ébullition.

3°. Que, suivant leur nature, ils bouillent à l'air libre à différens degrés de température, mais que lorsqu'ils sont en ébulli-

tion, leur température n'augmente plus, quelque violente que soit l'action du feu.

4°. Que l'eau, par exemple, peut bouillir à toute température; que c'est la diminution ou l'augmentation de pression qui rapproche ou recule le degré de température auquel l'ébullition peut avoir lieu.

5°. Que les liquides, échauffés dans des vases parfaitement fermés, exercent une pression d'autant plus forte sur les parois des vases, qu'ils sont portés à une plus haute température, quand bien même la vapeur ne pourrait pas se former, faute d'espace dans le vase : les molécules d'eau forcées de rester à l'état liquide par la violence de la pression, recèlent toute la force expansive que la vapeur pourrait déployer en se formant.

6°. Enfin, qu'à chaque bouffée de vapeur qui s'échappe d'un liquide en ébullition, une quantité considérable de calorique devient latente et sort avec la vapeur, et que cette dépense de calorique augmente avec la quantité de vapeur, *en poids*, qui se dégage dans un temps donné.

CHAPITRE XXXVII.

Suite du même sujet.

QUATRIÈME QUESTION. *Quelle est l'action du calorique sur les fluides aériformes, et principalement sur la vapeur et sur l'air?*

Nous avons examiné, dans les deux questions précédentes, l'action du calorique sur les corps solides et liquides, avec les divers phénomènes qu'elle présente suivant les variations de

circonstances qui peuvent l'accompagner. Pour connaître cette action sur les corps, dans les trois états sous lesquels ils peuvent exister ou existent dans la nature, il nous reste à l'étudier quand les fluides aériformes sont exposés au calorique.

Toutefois nous nous bornerons ici à l'examen des lois de la propagation du calorique dans les fluides aériformes, et les changemens de volume qu'il opère sur ces corps, nous réservant de traiter en détail les propriétés de la vapeur dans la question suivante.

Les liquides sont moins bons conducteurs que les solides, et les gaz ou fluides aériformes, moins bons conducteurs que les liquides. D'où il résulte, par exemple, qu'un corps échauffé, s'il est enveloppé d'une couche d'air renfermée de toutes parts, se refroidira beaucoup moins vite que s'il était en contact immédiat avec un liquide, et à plus forte raison avec un solide.

Les fluides aériformes s'échauffent au surplus à la manière des liquides, par courans ascendans chauds, et courans descendans froids; et à raison de la grande ténuité de leurs molécules et probablement de la distance qui les sépare entr'elles, le calorique rayonne au travers des fluides aériformes, et ne paraît pas y rencontrer d'obstacle.

La mobilité de leurs molécules est très-grande, et ils s'échauffent très-rapidement, non-seulement par cette mobilité extrême, mais encore parce qu'ils ont en général trop peu de capacité pour le calorique, ou, si l'on veut, de calorique spécifique; c'est-à-dire que de l'air, par exemple, échauffé à 20 degrés au-dessus de la température de l'atmosphère, fondrait moins de glace en redescendant à cette dernière température, qu'un poids égal d'eau échauffée au même point que l'air.

La table suivante donne la chaleur spécifique de divers fluides aériformes, comparée à celle de l'eau, prise pour unité.

	Chaleur spécifique.
Eau	1,0000
Air atmosphérique	0,2669
Vapeur d'eau	0,8470
Gaz hydrogène	3,2936
Acide carbonique	0,2210
Oxigène	0,2361
Azote	0,2754
Oxide d'azote	0,2369
Gaz oléfiant	0,4207
Oxide de carbone	0,2884

On voit par les nombres portés dans cette table, qu'un poids donné d'air échauffé à un certain degré n'augmenterait la température d'un poids égal d'eau que de 0, 2669 de degré, en se refroidissant *d'un degré* centésimal, et qu'un poids donné de vapeur dans les mêmes circonstances n'élèverait la température de l'eau que de 0,8470 de degrés, en se refroidissant aussi *d'un degré* centésimal; il faut remarquer ici qu'on suppose une quantité de vapeur toute formée, qui ne se condense point, et dont on a élevé la température.

En divisant ces nombres par 75, on aurait, par exemple, le nombre de grammes de glace à 0 que le refroidissement d'un degré pourrait fondre, et en les divisant par 100, on aurait le nombre de grammes d'eau liquide qu'on pourrait élever de la température de la glace fondante à celle de l'ébullition.

Lorsque les fluides aériformes reçoivent l'action du calorique, ils se dilatent, et leur dilatation est plus considérable que celle des liquides, qui eux-mêmes se dilatent plus que les solides.

Cette dilatation des fluides aériformes de l'air comme de la vapeur, est uniforme et égale, pour chaque degré du thermomètre centigrade; nous avons vu à l'article de l'air, qu'elle est pour chaque degré, de 0,00375 ou de $\frac{1}{266,67}$ de son volume, à 0, sous la pression atmosphérique. Ainsi un volume donné

de vapeur, sous une certaine pression, auquel on communiquerait 1 degré de température, augmenterait en volume de $\frac{1}{266,67}$, la pression restant la même.

Puisque la dilatation des gaz est égale, pour chaque degré, à $\frac{1}{266,67}$ de leur volume à 0 degré, connaissant le volume d'un gaz à une température quelconque, on saura aisément ce que deviendra ce volume à toute autre température : en effet on aura la dilatation du volume de gaz, pour chaque degré, en divisant le volume par 266,67, nombre auquel on ajouterait ou duquel on retrancherait le nombre de degrés, suivant que la température du gaz serait au-dessus ou au-dessous de 0. Cette dilatation étant connue, on la prendra autant de fois qu'il y aura de degrés entre les deux températures, et on ajoutera la somme au volume, ou bien on l'en retranchera, selon que ce volume devra être plus ou moins grand que le volume cherché.

Ainsi, supposons qu'on ait 100 parties de gaz à 40 degrés au-dessus de 0, et qu'on veuille connaître le volume de ce gaz à 20 degrés, aussi au-dessus de 0; on divisera le volume 100 par $266\frac{2}{3} + 40$, ou par $306\frac{2}{3}$, et l'on aura pour quotient 0,326. Ce quotient multiplié par 20, nombre de degrés entre les deux températures, donnera 6,520, qui, retranchés de 100, volume primitif, donneront 93 parties, 48, pour le volume auquel se réduiront les 100 parties de gaz à 40 degrés.

Que si le gaz était au-dessous de 0, il est clair qu'il faudrait diviser son volume, non par $266\frac{2}{3}$ *plus* le nombre de degrés, mais par $266\frac{2}{3}$ *moins* le nombre de degrés dont la température serait au-dessous de 0. (*Chimie de Thénard.*)

On trouverait par la même règle les augmentations de volume de la vapeur d'eau, en se rappelant qu'il est toujours question ici d'une pression constante, de celle de l'atmosphère, par exemple.

M. Thompson a donné la table suivante des changemens de volume de l'air, pour divers degrés du thermomètre centigrade, depuis o degré jusqu'à 100 degrés (1).

---

(1) Cette table ne s'accorde point exactement avec la règle qu'on vient de donner. En effet, l'accroissement qui devrait être égal à 37500 en passant de o degré à 100 degrés centigrades, n'est ici que de 37440, ce qui fait une différence de 60, qu'il peut être permis de négliger. Cette légère erreur vient de ce qu'on a négligé de tenir compte de la fraction $\frac{1}{3}$ pour compléter l'accroissement 208, correspondant à $\frac{5}{9}$ de degré de température au-dessus de zéro.

TEMPÉRATURE.	VOLUME de l'air.	TEMPÉRATURE.	VOLUME de l'air.
Degrés.		Degrés.	
0	100000	22,77	108528
0,55	100208	23,33	108736
1,11	100416	23,88	108944
1,66	100624	24,44	109152
2,22	100832	25,00	109360
2,77	101040	25,55	109568
3,33	101248	26,11	109776
3,88	101456	26,66	109984
4,44	101664	27,22	110192
5,00	101872	27,77	110400
5,55	102080	28,33	110608
6,11	102288	28,88	110816
6,66	102496	29,44	111024
7,22	102704	30,00	111232
7,77	102912	30,55	111440
8,33	103120	31,11	111648
8,88	103328	31,66	111856
9,44	103536	32,22	112064
10,00	103744	32,77	112272
10,55	103952	33,33	112480
11,11	104160	33,88	112688
11,66	104368	34,44	112896
12,22	104576	35,00	113104
12,77	104784	35,55	113312
13,33	104992	36,11	113520
13,88	105200	36,66	113728
14,44	105408	37,22	113936
15,00	105616	37,77	114144
15,55	105824	43,33	116224
16,11	106032	48,88	118304
16,66	106240	54,44	120384
17,22	106448	60,00	122464
17,77	106656	65,55	124544
18,33	106864	71,11	126624
18,88	107072	76,66	128704
19,44	107280	82,22	130784
20,00	107488	87,77	132864
20,55	107696	93,33	134944
21,11	107904	98,88	137024
21,66	108112	100,00	137440
22,22	108320		

CHAPITRE XXXVIII.

Cinquième question. *Quelles sont les propriétés mécaniques de la vapeur, et les circonstances qui influent sur sa force ?*

Lorsque l'eau se convertit en vapeur, soit à l'air libre et sous la pression atmosphérique, soit dans d'autres circonstances où la pression est nulle, plus faible ou plus forte que celle de l'atmosphère, il y a, ainsi que nous l'avons dit plus haut, absorption d'une grande quantité de chaleur, qui résulte du changement d'état que subit le liquide.

Il est évident que si, par le fait seul de la production de la vapeur, cette absorption n'avait point lieu, le calorique s'accumulerait dans le liquide, et lorsqu'il y en aurait assez pour réduire toute la masse liquide en vapeur, un énorme volume de vapeur éclaterait avec une violente explosion.

Nous avons vu que ce n'est pas ainsi qu'elle se forme : le calorique, à mesure qu'il pénètre dans le liquide, arrive à la surface, et là se combine en certaines proportions avec les molécules d'eau, pour donner naissance à la vapeur. Celle-ci s'échappe et emporte avec elle précisément toute la quantité de calorique que le liquide reçoit du feu, à l'action duquel il est exposé. C'est pour cela que l'eau parvenue à l'ébullition, n'importe sous quelle pression, ne peut plus augmenter de température, puisqu'elle dépense en calorique précisément autant qu'elle reçoit.

Que si la pression exercée sur la surface de l'eau d'une chaudière était telle que le calorique pût s'y accumuler en assez

grande quantité pour réduire la masse d'eau toute entière en vapeur, la formation de celle-ci serait instantanée, et offrirait de grands dangers.

Ce n'est donc que graduellement qu'il faut la produire pour en faire usage avec sécurité, et cette production est d'autant plus active, qu'il y a moins de pression et plus de chaleur, que la masse liquide est plus petite en comparaison du foyer comburant, et le nombre de points de contact de celle-là avec celui-ci, plus grand. Elle est très-prompte et, pour ainsi dire, instantanée lorsqu'on projette, par exemple, des gouttes d'eau très-petites sur un fer rouge; l'on remarque, lorsque celles-ci sont un peu grosses, le fer serait-il rouge à blanc, qu'il leur faudrait un certain temps, d'une durée facilement appréciable, pour être entièrement converties en vapeur. On regarde comme un fait certain qu'il faut 5 *à* 6 *fois* autant de temps pour réduire en vapeur, avec un foyer donné, une certaine quantité d'eau froide, qu'il en a fallu pour l'amener avec ce même feu, à la température de l'ébullition.

On ne sera point étonné du temps qu'exige la production artificielle de la vapeur, si nous nous rappelons qu'un kilogramme de vapeur, à 100 degrés de température, doit contenir autant de calorique que $5^{kil},66$ d'eau à la même température de 100 degrés; aussi les molécules d'eau, extrêmement ténues, subtiles dans la vapeur, sont tellement écartées les unes des autres, par le calorique combiné avec elles, qu'un centimètre cube d'eau, au *maximum* de condensation, c'est-à-dire à $3^{\circ},89$ centigrades environ, donne sous la pression de 76 centimètres de mercure, un volume de vapeur de $1696^{\text{centim. cubes}},4$, à 100 degrés centigrades, ou, en d'autres mesures, un *pouce cube* d'eau donne à peu près un *pied cube* de vapeur. Il résulte de là que 1000 centimètres cubes, ou un litre de vapeur, sous

cette pression, et à cette température, ne pèse que $\frac{1^{\text{gramme}}}{1,6964}$; ce qui prouve que cette vapeur est plus légère que l'air atmosphérique sec, pris à la même température et sous la même pression; car nous avons vu, en son lieu, que l'air, dans ces circonstances, pèse $\frac{1^{\text{gramme}}}{1,05777}$; le poids de la vapeur est donc à celui de l'air à peu près comme 10 est à 16.

Ceci vous montre quel énorme volume de vapeur vous formez avec un mètre cube d'eau, par exemple; quelle quantité de calorique vous devez consommer, et quelle force vous obtenez, puisque cette vapeur, à 100 degrés, tient en équilibre une colonne de mercure de 76 centimètres, ou une colonne d'eau d'environ 32 *pieds* de hauteur.

Dans la combinaison qui se fait du calorique et des molécules d'eau, pour donner naissance à ce fluide aériforme qu'on nomme vapeur, y a-t-il des proportions fixes des deux principes constituans; ou plutôt, des quantités égales d'eau étant complétement réduites en vapeur, chacune dans des circonstances diverses. Y a-t-il eu, pour la formation de cette vapeur, la même consommation de calorique? Y a-t-il, dans les volumes respectifs de vapeur, la même proportion de calorique et de molécules d'eau? En outre, ces divers volumes de vapeur ont-ils dès lors la même température, et offrent-ils la même densité, ou la même tension ou force élastique?

Pour tâcher d'éclaircir ces questions, qui nous paraissent fondamentales, examinons séparément, 1°. la vapeur *toute formée*, renfermée dans un vase, comme si c'était de l'air, et entièrement isolée de l'eau qui l'a produite; 2°. la vapeur et le liquide qui la forme, renfermés ensemble dans un vase, d'abord vide d'air, et ensuite plein d'air, en prenant en considération, dans le premier cas comme dans le second, toutes les circonstances qui peuvent se présenter.

Rappelons-nous que si, à l'air libre, il faut porter l'eau à 100 degrés centigrades de chaleur, pour avoir de la vapeur, avec ce caractère de transparence et d'invisibilité qui la distingue d'une sorte de fumée épaisse ou de brouillard composé de globules d'eau très-sensibles à la vue; rappelons-nous qu'on obtient aussi de la vapeur à des températures beaucoup plus basses, lorsque la pression qu'éprouve la surface du liquide est moindre que celle de l'atmosphère, ou bien que la pression est nulle.

M. Gay-Lussac a observé que de l'eau à 19°,59 centigrades *au-dessous* de zéro, donne dans le vide une vapeur dont la tension est de 1mil.,353; ainsi l'on peut dire qu'à toute température il y a production de vapeur lorsqu'il n'y a point de pression, ou bien que la pression qui existe n'est pas suffisante pour vaincre la tension de la vapeur qui doit se former à la température du liquide soumis à l'observation.

Prenons donc une certaine quantité d'eau à 0 degré de température; plaçons-la dans une capacité disposée, par supposition, de manière qu'on puisse y faire le vide complétement, et que, quand elle sera pleine de vapeur, on puisse séparer le volume de ce fluide, de l'eau qui l'a formée. Cette vapeur donnera aussi 0 de température, si, par l'hypothèse qu'il faut admettre ici, aucune chaleur extérieure ne peut atteindre notre capacité.

L'on a observé qu'à 0 degré centigrade, la tension de la vapeur est représentée par une colonne de mercure de 5mil.,059 de hauteur, c'est-à-dire qu'un tube barométrique, communiquant avec la capacité entièrement vide, donne 0 d'élévation, et lorsqu'elle est pleine de cette vapeur, il donne 5mil.,059 d'élévation de mercure dans le tube.

Remarquons, avant d'aller plus loin, qu'aussitôt que la ca-

pacité dont il s'agit est pleine de vapeur de 5$^{mil.}$,059 de tension, l'eau ne peut plus en fournir à ce degré de température; cette pression suffit pour l'en empêcher; l'on dit, dans ce cas, que l'espace vide de cette capacité est *saturé* de vapeur, ou, en d'autres termes, que l'espace en contient autant qu'il peut en recevoir, quand on ne change rien ni à la température du liquide, ni à la pression qui règne dans l'espace que la vapeur remplit.

Ainsi donc, pour ne pas compliquer l'examen de ce volume limité de vapeur, nous supposons d'abord, comme nous l'avons dit plus haut, que le vase qui le contient est séparé du liquide, et que c'est à une masse isolée de vapeur que nous avons affaire.

Or quels sont les divers genres de changemens ou d'action auxquels nous pouvons soumettre cette masse de vapeur? les voici :

1°. Exposer le volume de vapeur à une température inférieure à la sienne.

2°. Soustraire de la capacité une portion de la vapeur qu'elle contient, ou étendre cette capacité.

3°. Introduire dans la capacité une portion nouvelle de vapeur au même degré de température, ou à des degrés différens; ou bien diminuer l'espace qui renferme la vapeur, par l'introduction d'un liquide ou d'un corps solide, à la même température ou à des températures différentes.

4°. Échauffer d'abord la capacité pleine de vapeur à o, en saturant l'espace, par l'application du calorique à l'extérieur du vase, et ensuite dans les diverses circonstances détaillées ci-dessus.

Il ne nous paraît pas qu'on puisse supposer d'autres changemens, d'autres actions; voyons donc quels sont les divers

phénomènes qui doivent se présenter dans chacun de ces cas, en nous appuyant incessamment sur les faits incontestables qu'on doit aux recherches des physiciens les plus célèbres.

1er. *cas*. Si nous exposons notre volume de vapeur à 0 de température, avec le vase qui le contient, à un froid extérieur, par exemple, de 19$^{o\ centig.}$, 59, au-dessous de 0, les parois de ce vase se refroidiront à ce degré, une partie du calorique combiné avec la vapeur passera dans ces parois, et une portion de vapeur seulement redeviendra liquide, mais la tension de la vapeur restante, au lieu d'être de 5$^{mil.}$, 059, ne sera plus que de 1$^{mil.}$, 353; c'est-à-dire que par ce refroidissement vous avez rendu la force de la vapeur environ 4 *fois* plus petite, sans cependant la détruire entièrement.

Il est impossible, en effet, que vous la détruisiez entièrement, puisqu'à 19°,59 au-dessous de 0 et dans le vide, l'eau donne encore une vapeur de 1$^{mil.}$, 353 de tension. Or, comme c'est à ce point que vous avez réduit la température, et que le vide complet se ferait dans votre vase, si la vapeur se condensait entièrement, ce dernier effet ne peut avoir lieu, puisqu'à cette basse température il y a encore tout ce qu'il faut pour maintenir l'existence d'une vapeur de 1$^{mil.}$,353 de tension; vapeur qui, avec la petite portion de liquide qui s'est formée, remplit encore tout le vase, comme avant le refroidissement.

Il serait superflu pour nous de nous arrêter à la question de savoir à quel degré de froid il faudrait exposer cette dernière vapeur pour en réduire la tension à 0 et obtenir un vide parfait; il nous suffit de savoir qu'un vase plein de vapeur *pure*, sans mélange d'air ou de gaz, à 0 de température, est encore plein de vapeur, saturant l'espace, même en le refroidissant de 19°,59.

Il est vrai de dire que la tension de la vapeur à 19°,59

et même à o est si faible que, dans l'usage que la science de la mécanique fait de ce fluide, on peut négliger cette tension, et considérer comme vide la capacité où elle règne.

Quoi qu'il en soit, nous voulons montrer par un fait bien constaté, qu'on ne détruit pas la vapeur qui remplit un vase, et toute la force qu'elle possède lorsqu'on la refroidit : on l'affaiblit, et le degré d'affaiblissement dépend de la quantité dont vous avez abaissé la température. Ceci étant vrai pour de la vapeur à o, à plus forte raison l'est-il pour de la vapeur à 100 degrés, *minimum* de chaleur dont on se sert, lorsqu'on fait agir ce fluide comme moteur.

Il faut remarquer que quand on refroidit la vapeur de o degré à — 19 degrés, une partie de la chaleur l'abandonne ; mais aussi une portion de cette vapeur repasse à l'état liquide ; et bien que la vapeur restante continue de remplir la capacité, elle a évidemment moins de densité, c'est-à-dire que le volume de cette vapeur contient un moindre nombre de molécules d'eau, que le même volume à o de température.

2me. *cas.* Si, par un moyen quelconque, nous aspirons, hors de notre vase, la moitié, par exemple, *en poids*, de la vapeur qu'il renferme, ou ce qui serait équivalent, si nous en doublions tout à coup la capacité, la vapeur prenant incontinent tout l'espace qui lui est ouvert, dans les deux suppositions, s'étend et remplit comme précédemment toute la capacité ; mais la tension sera diminuée de moitié, et l'on ne peut plus dire que cette vapeur sature l'espace ; car le vase n'en contient plus autant qu'il peut en contenir à o de température ; c'est-à-dire que si l'on introduisait de nouvelle eau à o, celle-ci fournirait précisément la quantité de vapeur que nous avons ôtée, ou une quantité égale à celle que contenait le vase, avant que la capacité en fût doublée.

Un autre phénomène acccompagne, dans le cas ci-dessus, la raréfaction de la vapeur et la diminution de tension ; c'est que cette vapeur, au moment de la raréfaction, n'est plus à o degré de température, mais au-dessous : une portion du calorique devient latent ; et pour que cette masse de vapeur se remette en équilibre de température avec les parois du vase, elle doit en soutirer une certaine quantité de calorique.

Ce phénomène a lieu toutes les fois qu'on agrandit tout à coup un espace saturé de vapeur, quelle que soit la température de celle-ci ; ou bien qu'on soutire de cet espace une portion de vapeur, par quelque moyen mécanique : la vapeur se refroidit incontinent et se trouve capable d'enlever du calorique à ses enveloppes. Il résulte évidemment de ce phénomène que pour condenser une vapeur ainsi raréfiée, il faudrait la mettre en contact avec un corps plus froid, qu'il ne devrait l'être avec la vapeur telle qu'elle était avant la raréfaction ; attendu que, pour opérer la condensation, il faut présenter à la vapeur un corps en état de lui enlever du calorique ; or la vapeur raréfiée est plus froide qu'avant la raréfaction ; donc il faut le contact d'un corps plus froid, pour la faire repasser en partie à l'état liquide.

Il suit encore de ce phénomène que dans la conduite de la vapeur par des tuyaux, vous êtes plus exposé à perdre de sa chaleur, lorsqu'elle se presse sur elle-même dans son passage, que lorsqu'elle peut s'étendre et s'y raréfier.

Enfin, que vous pouvez obtenir la même diminution de tension par la raréfaction de la vapeur, que par une condensation partielle, comme elle a toujours lieu dans le vide.

3me. *cas*. Au lieu de soutirer de la vapeur de notre vase, ou d'augmenter tout à coup la capacité, si nous y introduisons par force une nouvelle quantité de vapeur, ou si nous dimi-

nuons la capacité de ce vase, il se présente d'autres phénomènes que nous allons successivement examiner.

Supposons d'abord que nous fassions entrer dans le vase un volume de vapeur égal à celui qu'il contient, et à la même température; ou bien que nous nous efforcions de réduire autant que possible l'espace occupé par la vapeur.

A mesure que ce volume additionnel de vapeur entrera, ou que la capacité diminuera, une portion du calorique latent de la vapeur redeviendra sensible; il semblera en sortir comme l'eau d'une éponge qu'on presse, et la moitié du poids et de la vapeur du vase et de la vapeur nouvelle repassera à l'état liquide; ce sera dans le premier cas, l'équivalent du volume de vapeur introduit qui se condensera par la pression qu'il faut, par hypothèse, exercer pour le faire entrer dans le vase; et dans le second cas, ce sera le volume primitif de la vapeur qui se condensera tout entier, car on parviendra à réduire les dimensions de l'espace jusqu'à ne plus contenir que le liquide provenant de la condensation.

Dans les deux cas, il y a production de calorique qui se dissipe par les parois du vase.

Une première conséquence importante découle de cette observation : c'est qu'il est impossible d'augmenter la tension de la vapeur, en introduisant par le concours d'une force mécanique étrangère, dans un espace saturé, une nouvelle portion de vapeur à la même température, ou bien exerçant sur le volume primitif de vapeur une pression qui tendrait à le réduire à de plus petites dimensions : une portion de la vapeur, dans les deux hypothèses, repasse inévitablement à l'état liquide, et la tension est la même qu'auparavant. N'oublions pas que nous supposons ici qu'aucune circonstance extérieure ne peut concourir à changer, ni en plus, ni en moins, la température

de la vapeur soumise à l'expérience dont nous parlons; nous supposons seulement que le calorique s'échappe de la vapeur par la pression; ce qui est vrai en réalité.

Par l'expérience précédente, qui est l'inverse de celle-ci, nous parvenons bien à diminuer la tension de la vapeur, soit par la soustraction qu'on en fait, soit par l'augmentation de l'espace; mais par l'introduction forcée de la vapeur dans un espace saturé, ou par la réduction, par pression, du volume de la vapeur dans cet espace, nous n'obtenons pas l'effet inverse, qui serait d'augmenter la pression de la vapeur. Or ceci vient de ce qu'en raréfiant la vapeur, nous ne lui ôtons aucune portion du calorique qui la constitue vapeur, sous la pression primitive, mais en la comprimant nous en faisons sortir une portion d'autant plus grande que la compression est plus forte. Alors ce qui peut rester de calorique ne suffit plus pour maintenir à l'état de vapeur tout le liquide, qui était dans cet état avant la compression; et cette pression peut être telle que toute la vapeur repasserait à l'état liquide. Ce qui arrive lorsqu'on réduit jusqu'à rien la dimension de l'espace, sauf la place que le liquide doit occuper, ainsi que nous l'avons supposé plus haut.

Nous disions tout-à-l'heure que la moitié en poids de la vapeur du vase, et de la vapeur introduite repassait à l'état liquide, et que la tension restait la même qu'auparavant; revenons à cette expérience et poursuivons nos observations.

Une portion du calorique s'est dissipée, parce que nous savons que les corps dont on peut faire des enveloppes, des vases, conduisent tous la chaleur. Si cependant les parois du vase n'étaient point perméables à la chaleur, et que celle-ci fût par conséquent forcée de rester dans l'espace occupé par la vapeur, aucune pression, quelle qu'elle fût, ne pourrait condenser la vapeur; elle serait comme l'air, ou ce qu'on appelle les *gaz*

permanens, qui ne se liquéfient sous aucune pression quelle que puissante qu'elle soit; mais cette remarque n'est point applicable, puisque aucun corps n'est imperméable à la chaleur.

Notre vase contient donc, après l'introduction de ce volume de vapeur, deux fois le poids de l'eau qui existait avant dans l'espace, sous forme de vapeur, et dont la moitié est à l'état liquide et l'autre à l'état de vapeur. Or si tout à coup nous doublons l'espace, la vapeur existante se raréfiera, sa tension diminuera, et se refroidissant parce qu'une portion de son calorique devient latente, elle attirera par cela même ou tendra à attirer du calorique des corps environnans; enfin le liquide du vase se réduira de nouveau en vapeur. Vous aurez ainsi deux volumes de vapeur à la tension et à la température primitives, mais dans un espace double. Or il a fallu que la vapeur en se raréfiant, reprît des corps environnans le calorique qu'elle avait perdu en se comprimant par l'introduction forcée du volume additionnel de vapeur; que si, par hypothèse, elle n'avait pu le récupérer, tout le liquide n'aurait pas repassé à l'état de vapeur, attendu que la température de l'intérieur du vase serait restée au-dessous de 0 degré; la tension primitive serait aussi affaiblie.

Maintenant si, au lieu de doubler l'espace, nous en soutirons un volume de vapeur égal à celui que nous y avions introduit, le liquide que contient le vase reparaît aussitôt à l'état de vapeur et présente la même température et la même tension qu'avant l'expérience. Voici comment les choses se passent : dès que vous commencez à soutirer la vapeur, il y a raréfaction, absorption de calorique des corps environnans, la tension diminue et le liquide fournit à chaque fois une quantité de vapeur égale à celle que vous puisez; de telle sorte qu'au moment où le liquide achève de se réduire en vapeur, un volume

de vapeur, égal à celui qui reste, doit avoir été soutiré. Si vous continuiez l'extraction de la vapeur, elle perdrait de sa tension et se raréfierait.

On conçoit qu'introduire dans un espace saturé de vapeur, une nouvelle masse de vapeur, à la même température, c'est comme si vous diminuiez l'espace par l'introduction d'un corps liquide ou d'un corps solide, par un piston, par exemple, qu'on ferait descendre dans un cylindre plein de vapeur.

Mais pour produire avec un corps solide ou liquide le même effet qu'avec un volume égal de vapeur, c'est-à-dire pour faire repasser à l'état liquide toute la vapeur qui sature l'espace avant l'introduction, il faut évidemment que le corps introduit s'empare de tout cet espace, à l'exception de la très-petite place que le liquide, qui se forme par la condensation de la vapeur, doit occuper. Ainsi, par exemple, si le vase était un corps de pompe, il faudrait que le piston descendît très-près du fond pour anéantir la vapeur. Si on ne le faisait descendre qu'à la moitié de l'espace occupé par la vapeur, ce qui reviendrait à diminuer la capacité de moitié, la moitié de l'eau en vapeur repasserait à l'état liquide, et l'autre moitié conserverait son état et la même tension qu'auparavant.

Il résulte de là, en général, qu'un espace saturé de vapeur, sous une pression et à une température données, ne peut plus admettre, dans son sein, d'autres portions de vapeur, ou d'autres corps solides ou liquides à la même température, sans qu'une portion de cette vapeur ne se condense.

Voyons maintenant ce qui arriverait si nous introduisions dans notre vase de la vapeur à une température différente, c'est-à-dire au-dessus ou au-dessous de o.

Nous devons prévenir que cette introduction de vapeur dans un espace saturé n'est qu'une supposition dont nous croyons

devoir nous servir pour faire connaître bien à fond les qualités de la vapeur. On conçoit que pour l'introduire il faudrait la comprimer, et qu'en la comprimant on la dénaturerait avant d'entrer dans l'espace.

Si la vapeur à introduire était au-dessous de o degré, elle n'aurait pu être formée que sous une pression moindre que celle de la vapeur renfermée dans le vase, et elle aurait par conséquent une tension moindre. Elle ne pourrait donc se maintenir où régnerait une pression plus forte que celle sous laquelle elle a pu se développer; et à son arrivée dans le vase elle se condenserait et abandonnerait son calorique latent qui pourrait élever, pour quelques instans, la température de notre capacité.

Si la vapeur à introduire est plus chaude que celle du vase, à quelque degré que ce soit au-dessus de o, il faut savoir que les conditions de son existence sont rigoureusement : la température à laquelle elle s'est formée, la dimension de l'espace qu'elle peut saturer, la pression sous laquelle elle a pu le remplir; or changez une de ces conditions, et la vapeur n'est plus de la même espèce, elle change de caractère : abaissez la température de l'espace qui la contient, une portion de cette vapeur se condense, et sa tension diminue; changez les dimensions de l'espace, elle se condensera en partie, si vous les réduisez jusqu'à un certain point; et si vous les augmentez, elle se raréfiera en perdant de sa tension. Ce double phénomène paraîtra aussi, si vous faites varier la pression sous laquelle elle s'est formée avant l'introduction dans le vase dont il s'agit.

Il est donc facile de concevoir que cette vapeur plus chaude, arrivant dans un espace saturé de vapeur à o de température, se condensera en même temps qu'elle échauffera le vase et

augmentera la tension de la vapeur renfermée dans ce vase, jusqu'à ce que les corps environnans aient absorbé le calorique ramené à la température de l'espace à o. Dès ce moment la vapeur primitive a repris sa tension, et notre capacité est dans le même état qu'auparavant, si ce n'est qu'elle contient en plus la quantité d'eau dont la vapeur introduite était composée.

Les résultats ne seraient pas les mêmes, si l'on introduisait dans la capacité un certain volume de liquide ou de corps solide d'une température différente de celle de la vapeur.

Un liquide ou un solide plus froids condenseront une partie de la vapeur, non-seulement parce qu'ils viennent diminuer l'espace rempli par la vapeur, mais encore parce qu'ils s'emparent d'une portion du calorique combiné avec cette vapeur. Celle qui reste dans l'espace n'a plus que la tension qui appartient au nouveau degré de température qui affecte l'espace depuis l'introduction de ce corps. Si le vase revenait à o de température, la vapeur reprendrait sa tension primitive; mais comme l'espace est diminué, la portion de vapeur condensée resterait à l'état liquide, attendu qu'il ne faut plus autant de vapeur pour saturer l'espace ainsi réduit dans ses dimensions.

Les effets produits par l'introduction d'un volume de liquide ou de solide plus chauds que la vapeur du vase dépendent et de la réduction qu'ils opèrent sur l'espace occupé par la vapeur, et du degré de chaleur qu'ils ont.

D'abord s'ils venaient remplir tout l'espace, la vapeur se condenserait entièrement, quel que fût leur degré de chaleur; mais si ce n'était qu'en partie, une portion de vapeur se condenserait dans le cas où le corps introduit n'apporterait pas avec lui assez de chaleur pour maintenir à l'état de vapeur toute la quantité d'eau dont était composée la vapeur à o, saturant un espace plus grand.

Supposons, par exemple, que nous réduisions à moitié le volume primitif de notre vapeur à o, et que le calorique ne puisse pas s'en échapper; la température de la vapeur s'élèvera ainsi que sa tension; si donc le corps vient occuper la moitié de l'espace, et qu'il apporte avec lui assez de calorique pour élever la température de la vapeur au point où elle le serait, en la réduisant à la moitié de son volume par la compression sans perte de calorique, comme nous venons de le supposer, il paraît évident qu'il n'y aurait point de condensation, mais production d'une vapeur plus chaude et d'une tension plus grande qu'avant l'introduction du corps, tension qui dépendrait et des degrés de température et du rétrécissement de l'espace. On conçoit au surplus que, pour qu'il n'y ait pas de condensation, il faut que la température s'élève à proportion que l'espace devient plus petit : nous allons bientôt revenir sur ce sujet.

4e. *cas*. Nous avons supposé, dans la plupart de nos remarques précédentes, qu'on opérait sur de la vapeur à une température déterminée, et que tout accès du calorique extérieur était interdit. Ce n'est que dans les dernières que nous avons examiné le cas de l'introduction d'un solide ou d'un liquide plus chauds que la vapeur; mais ces corps n'apportaient dans le sein de cette vapeur qu'une portion définie de calorique qui ne pouvait se renouveler; il s'agit maintenant de voir ce qui se passe lorsqu'on expose un volume de vapeur, que nous prendrons encore à o degré de température, à l'action permanente et successive du calorique, en un mot à l'action du feu.

Notre vapeur, à o de température, sature complétement l'espace que lui offre le vase dont nous nous servons, c'est-à-dire qu'à o de température un espace vide de cette dimension ne peut admettre ni plus ni moins de vapeur qu'il n'y en a.

Aussitôt que vous échaufferez ce vase, une nouvelle portion de calorique se répandra entre les molécules de vapeur et tendra à les écarter les unes des autres; mais comme le vase est fermé et supposé inextensible, pour plus de simplicité, le volume de la vapeur reste le même, et le calorique qui la pénètre, quelle qu'en soit la quantité, se montre sensible au thermomètre; aucune portion de ce fluide ne devient latente parce que la vapeur est toute constituée, lorsque nous la soumettons à l'action du feu. Les seuls changemens qui s'opèrent donc par cette action sont l'élévation de la température et l'augmentation de la tension. La vapeur dès lors a changé d'espèce, et l'espace qui était saturé de la vapeur à o n'est plus saturé lorsque vous avez élevé sa température : ce qui revient à dire que si vous aviez soumis, dans notre vase vide d'air, une certaine quantité d'eau à une température égale à celle que vous donnez maintenant à la vapeur primitivement à o, vous auriez réduit en vapeur plus d'eau qu'en opérant à o comme nous l'avons supposé ci-dessus; l'espace, pour se saturer, aurait donc admis plus de vapeur.

Il résulte de là que vous pourriez introduire dans cet espace une nouvelle portion de vapeur à la température primitive, pour achever de le saturer; ou bien que vous pourriez comprimer cette vapeur, en diminuant l'espace jusqu'au point d'être en état de saturation; et dans les deux cas la tension augmenterait et correspondrait à celle que vous obtiendriez tout d'un coup en laissant évaporer dans le vase autant de liquide qu'il en faut pour saturer l'espace à cette température.

Si vous soutirez de notre vase la moitié du volume de la vapeur échauffée, ou, ce qui serait la même chose, si vous doubliez l'espace qui la renferme, une portion de son calorique deviendrait latent, la température s'abaisserait, et la tension serait

diminuée de moitié, en supposant que l'action du feu eût cessé.

Mais avant comme après l'augmentation de l'espace, ou la soustraction d'une partie de vapeur, introduisez dans le vase de l'eau à la même température que celle à laquelle vous avez porté la vapeur par l'action du feu; quelle que soit cette température au-dessus de o, l'eau bouillira jusqu'au moment où l'espace sera saturé de vapeur, après quoi l'eau ne fournira plus de vapeur; et l'on conçoit qu'elle en fournira d'autant plus que la vapeur aura été plus raréfiée, et que la température sera plus élevée, et réciproquement.

Il serait superflu de dire ce qui arriverait si l'eau était plus froide que la vapeur, on peut le déduire de ce que nous avons établi précédemment, ou bien si l'on introduisait au lieu d'eau un corps solide plus froid ou plus chaud que la vapeur. Si cependant ce corps solide n'avait que la température de la vapeur, et que son volume fût tel qu'il vînt réduire l'espace au point que la vapeur ne pût se maintenir aussi comprimée sans recevoir une nouvelle dose de calorique, une portion de la vapeur se condenserait, parce qu'il y a pour chaque température, un espace déterminé et un point de saturation qu'on ne peut changer sans affecter une vapeur donnée ou de condensation ou de raréfaction.

Enfin, en continuant l'action du calorique sur la vapeur renfermée dans notre capacité, on augmenterait graduellement la tension. On ne trouve rien dans les faits relatifs à la vapeur qui puisse faire assigner une limite à cet accroissement, en supposant que le vase pût résister; mais si la vapeur pouvait s'échapper à mesure qu'elle reçoit l'action de la chaleur, on la dilaterait à tel point que sa tension deviendrait presque nulle.

Nous venons d'étudier la vapeur isolée, prise dans toutes

les circonstances qui peuvent se présenter ; nous avons maintenant à la considérer en présence de l'eau qui la fournit et peut la renouveler dans le même vase.

1°. Introduisez dans le récipient vide d'air de l'eau à 0 degré de température, et en quantité telle qu'il en reste une portion à l'état liquide, dans le cours de nos expériences. L'espace qui se trouve au-dessus de l'eau sera bientôt saturé de vapeur à 0 de température et au degré de tension qui appartient à cette espèce de vapeur.

2°. Exposez-la à une température plus basse, une partie se condensera et se réunira, au fond du récipient, à l'eau restante, et vous aurez une vapeur d'une tension moindre, et correspondante au degré de température nouveau dont le récipient et le liquide sont affectés.

3°. Soutirez de votre récipient une portion de vapeur ; aussitôt celle-ci se raréfiera, sa tension diminuera, et l'eau fournira continuellement une nouvelle quantité de vapeur, de telle sorte qu'après avoir soutiré, par exemple, un volume de vapeur égal à l'espace vide du récipient, cet espace serait encore saturé de la même vapeur que l'eau aurait produite. En continuant ainsi d'extraire de la vapeur, vous parviendriez à réduire toute l'eau du récipient en vapeur ; en supposant, bien entendu, que la température est entretenue au même point.

4°. Doublez tout à coup l'espace qui renferme la vapeur ; la tension diminue à l'instant ; une nouvelle portion d'eau peut dès lors se réduire en vapeur, et vous obtenez bientôt, dans votre récipient doublé, un double volume de vapeur au degré de tension primitif.

Triplez, quadruplez l'espace, en le maintenant à 0 de température ; de nouvelle vapeur se formera, et au bout d'un temps assez court l'espace sera saturé, et il y régnera la même ten-

sion qu'auparavant; car ce n'est qu'à ce point de tension, la température restant la même, que l'eau ne peut plus fournir de vapeur. On peut concevoir un agrandissement d'espace tel, que toute l'eau se réduirait en vapeur; mais à quel degré de tension? ce n'est pas assurément au-dessus de celui qui correspond à o degré, puisque, au-dessus de cette tension, l'eau ne donnerait plus de vapeur; mais ce peut être au-dessous, en supposant que l'espace ait été augmenté à tel point que la vapeur se soit raréfiée, après que l'eau serait entièrement passée dans cet état.

5°. Cherchez à introduire une nouvelle quantité de vapeur à o degré, il arrivera, comme précédemment avec la vapeur isolée, que la quantité introduite repassera à l'état liquide. Comprimez la vapeur, en réduisant les dimensions de l'espace, elle se condensera aussi comme précédemment, et en totalité si vous prenez toute la place qu'elle occupe; ce que, nous le répétons, vous pouvez faire avec la vapeur, et jamais avec l'air.

6°. Introduisez de la vapeur, échauffée et *dilatée* à un degré tel, qu'après avoir partagé son calorique avec le récipient et avec la vapeur et le liquide qu'il renferme, la température résultante soit précisément celle qui permet à l'espace donné de contenir, non-seulement la vapeur primitive, mais encore celle que vous y avez introduite, il n'y aura point de condensation; mais bien élévation de température et de tension correspondante à cette température. On conçoit que la vapeur d'introduction pourrait être portée à un degré de chaleur suffisant, pour mettre l'eau contenue dans le récipient en état de fournir de nouvelle vapeur pour saturer l'espace, et la vapeur résultante serait alors plus dense que précédemment. On conçoit aussi que la vapeur introduite pourrait ne pas apporter assez de

calorique *libre* pour élever la température du récipient et s'y maintenir dans le même état : ce qui amènerait une condensation partielle ; condensation au surplus qui aurait toujours lieu, si la vapeur d'introduction n'était point, avant, dilatée par la chaleur.

Il serait inutile de dire ce que produirait l'introduction d'un liquide ou d'un solide échauffés, qui viendraient, par leur volume, rétrécir l'espace ; on peut aisément le prévoir d'après ce que nous avons dit précédemment.

7°. Enfin, soumettez votre récipient à l'action graduelle du calorique ; comme il n'y a de pression dans ce récipient que celle qui résulte de la tension de la vapeur, tension que vous savez n'être que de $5^{mil},059$, l'eau commence à bouillir bien au-dessus de 100 degrés centigrades, qu'il faut sous la pression atmosphérique ; ainsi que nous l'avons vu plus haut. La vapeur s'accumule donc, se replie, pour ainsi dire, sur elle-même dans l'espace, à mesure que vous pressez l'action du feu, et qu'il y a plus de portions d'eau qui se réduisent en vapeur. Au bout de quelque temps d'action, toute l'eau pourra disparaître et votre récipient ne contenir que de la vapeur.

Remarquez qu'à chaque degré d'élévation de température, la vapeur a changé d'espèce, c'est-à-dire qu'elle a acquis plus de tension, et que, sous le même volume, elle contenait plus de molécules d'eau, car le récipient est supposé n'avoir point varié de dimensions. Ainsi donc, la tension et la densité de la vapeur augmentaient avec chaque degré de température ; et à chaque degré de température l'espace était toujours saturé, comme au degré précédent, mais d'une espèce de vapeur différente et correspondante à chacun de ces degrés. Enfin, lorsque toute l'eau a été réduite en vapeur, en vertu d'un accroissement de chaleur suffisant, il ne vous était plus possible d'augmenter la densité

de la vapeur, en continuant l'action du feu, à moins que vous n'eussiez introduit de nouvelle eau dans le récipient; mais vous pouviez augmenter la tension de cette vapeur par le seul effet de l'accumulation du calorique entre le même nombre de molécules d'eau renfermées dans un espace inextensible. D'où il résulte que tant qu'il reste de l'eau à vaporiser, la tension et la densité de la vapeur se sont accrues ensemble; mais après, la densité n'a pas changé, bien que la tension ait continué d'augmenter par le seul effet de la chaleur.

Maintenant, pour nous faire une idée nette de ce qu'est la vapeur, supposons qu'au moment où toute l'eau était vaporisée et la vapeur arrivée au *maximum* de densité, qui correspond et à la quantité d'eau et de chaleur employées et à l'espace offert par notre récipient, supposons, disons-nous, que vous agrandissiez graduellement cet espace et que les parois du récipient décroissent régulièrement de température comme la vapeur, qui, en se raréfiant, rend latente une portion de chaleur, sensible à chaque degré de raréfaction ou d'augmentation d'espace : il est évident que de décroissemens en décroissemens de température, et d'agrandissemens en agrandissemens d'espace, vous pourriez arriver à une vapeur qui n'aurait plus que o de température, mais qui occuperait un espace immense en comparaison de celui qu'elle occupait dans le récipient primitif. Or, cette masse de vapeur à o contient et la même quantité de calorique et la même quantité d'eau; les proportions de ces deux principes constituans n'ont point changé; il n'y a de changé que la tension et le volume de la vapeur, ou ce qui revient au même la grandeur de l'espace occupé et saturé. Ceci est tellement vrai, qu'en diminuant graduellement l'espace, comme vous l'avez augmenté, et en supposant que les parois du récipient suivent, dans l'accroissement progressif de leur tempéra-

ture, celui de la vapeur; vous retrouverez la même vapeur, avec la même tension, la même densité et la même température qu'avant l'agrandissement, lorsque vous serez revenu aux dimensions primitives du récipient.

Que conclure de ces considérations fondamentales? c'est qu'un *poids donné* de vapeur à 0 de température contient la même quantité d'eau et de calorique que le *même poids* de vapeur à 50, à 100, à 200 degrés, etc., de température, lorsque ces diverses espèces de vapeur ont été formées et fournies jusqu'à saturation de l'espace, et sans qu'on les ait imprégnées, après, d'une nouvelle quantité de calorique, comme nous l'avons supposé, lorsque toute l'eau est réduite en vapeur et qu'on continue l'action du calorique sur cette vapeur. Les différences qu'on remarque entre ces diverses espèces de vapeur portent sur les volumes, les tensions, les densités et les températures; mais toutes peuvent être ramenées à la même espèce de tous points, en diminuant, ou en agrandissant, comme il convient, l'espace qui les renferme, espace qu'on suppose imperméable au calorique.

Ainsi un poids donné d'eau en vapeur, à 0 de température, présente un très-grand volume; et le même poids à 200 degrés de température, un très-petit en comparaison. Dans la vapeur à 0, la quantité de calorique et d'eau qu'elle comporte est disséminée, éparpillée dans un grand espace; et dans le même poids de vapeur à 200 degrés, cette quantité égale de calorique et d'eau est resserrée relativement dans un très-petit.

Pour bien établir cette importante proposition, il est peut-être nécessaire d'insister et de préciser les termes et les circonstances qui la rendent d'une évidence incontestable.

Prenons deux récipiens parfaitement égaux, vides d'air, communiquant chacun, par un tuyau armé d'un robinet, à un

petit réservoir d'eau. Les récipiens et l'eau sont à o degré de température, afin de partir du même point pour tous les deux.

Ouvrons le robinet du premier récipient; aussitôt celui-ci se remplit de vapeur à o, et l'espace est saturé en peu d'instans. Cette vapeur est formée d'un certain poids d'eau et d'une certaine quantité de calorique; quant à son volume, il est très-grand en comparaison de la petite quantité d'eau dont elle est constituée; mais aussi la pression qui règne dans le récipient est, vous le savez, extrêmement faible.

Ouvrons le robinet de l'autre récipient, et exposons-le avec son réservoir d'eau à l'action de la chaleur, élevons sa température successivement à 50, à 100, enfin à 200 degrés centigrades. Nous obtenons ainsi le même volume de vapeur que précédemment, mais cette vapeur varie d'espèce, à chaque différence de température. Or, il peut arriver de trois choses l'une : 1°. ou il y avait encore de l'eau dans le petit réservoir, lorsque vous êtes arrivé à 200 degrés; 2°. ou l'eau achevait précisément de s'épuiser, au moment où vous parveniez à cette température; 3°. ou bien toute l'eau était réduite en vapeur, avant d'avoir porté l'appareil à 200 degrés.

Dans le premier et le second cas, l'espace a été saturé de vapeur à 50 degrés et à 100 degrés, puisqu'il l'a été à 200 degrés. Il l'a été parce que le réservoir fournissait autant d'eau que l'affluence du calorique pouvait l'exiger, et rien ne s'est opposé à ce que l'espace fût saturé, ou, en d'autres termes, rempli de vapeur autant qu'il peut l'être, soit à 50 degrés, soit à 100 degrés, soit à 200 degrés; seulement la vapeur a été plus comprimée sur elle-même à 100 degrés qu'à 50 degrés; et à 200 degrés qu'à 100 degrés; et la saturation de l'espace admettait plus d'eau en vapeur à 100 degrés qu'à 50 degrés, et à 200 degrés qu'à

100 degrés; car la diminution de l'eau du petit réservoir a suivi l'élévation de la température.

Or comme à ces diverses températures la vapeur a le même volume, il est évident que son poids est d'autant plus grand qu'il y a plus d'eau vaporisée, et que la température est plus élevée; qu'ainsi le volume de vapeur à 200 degrés perd plus qu'à 50 degrés.

Nous disons que, dans ces deux cas, un poids de vapeur à 0 contient autant d'eau et de calorique qu'un poids égal de vapeur à 50, à 100, à 200 degrés; mais, nous le répétons, à 0 le volume en est beaucoup plus grand qu'à 50, à 50 qu'à 100 et à 100 qu'à 200 degrés, et enfin, en agrandissant progressivement le récipient qui renferme la vapeur à 200 degrés, vous feriez successivement de la vapeur à 100, à 50 degrés, et finalement à 0; et alors un volume de cette dernière vapeur, égal à celui du premier récipient, pèserait autant que le volume de la vapeur que renferme le premier récipient, et contiendrait autant d'eau et de calorique.

Voilà rigoureusement dans quel sens notre proposition est une vérité de fait qui semble incontestable, et voici dans quel autre elle admet quelques restrictions que l'examen du troisième cas va rendre nécessaires.

Supposons donc qu'avant d'être parvenu à porter la température du second récipient à 50 degrés, qu'arrivé, par exemple à 40 degrés, vous ayez vaporisé toute l'eau du petit réservoir, et que, malgré cela, vous n'ayez pas moins élevé la vapeur résultante à 50, à 100 degrés, à 200 degrés, en continuant l'action du feu; il est évident qu'à ces derniers termes de chaleur l'espace n'a pas été saturé; il ne l'a été que depuis 0 degré jusqu'à 40 degrés, c'est-à-dire tant qu'il y a eu de l'eau dans le réservoir. Après ce terme, la vapeur a changé en quelque

sorte de constitution en se mêlant ainsi avec les diverses doses de calorique libre dont vous l'avez successivement pénétrée; et comme le calorique n'a pas de poids appréciable, le volume de vapeur, à tous les degrés après 40 degrés, n'a pas plus de poids qu'à ce dernier degré : sa densité ne change pas et n'a plus aucune correspondance avec la température.

Vous voyez donc que de la vapeur ainsi constituée n'est plus comparable à celle du premier récipient qui sature l'espace à 0, et il ne serait plus vrai de dire qu'un poids donné de vapeur du second récipient échauffé, et ne contenant plus d'eau au-dessus de 40 degrés, donne les mêmes proportions d'eau et de calorique, qu'un poids égal de la vapeur à 0 du premier récipient. Il faudrait, pour rétablir les proportions, introduire de nouvelle eau dans le réservoir, et en quantité telle qu'il en restât encore au moment d'arriver à la température de 200 degrés; ou bien diminuer l'espace en comprimant cette vapeur, jusqu'à ce que le calorique excédant soit dissipé, et que dans l'espace ainsi réduit, une nouvelle quantité d'eau introduite ne puisse plus se vaporiser; c'est à ces deux conditions seulement que l'espace peut être saturé, et que les diverses espèces de vapeur sont comparables sous le rapport et de leur densité et des proportions constantes de leurs principes constituans, eau et calorique.

Il est aisé de concevoir que ce que nous venons de dire de l'effet produit par la chaleur s'applique à la soustraction d'une portion de vapeur, ou à l'agrandissement de l'espace, lorsqu'on serait arrivé au point d'avoir vaporisé toute l'eau du second récipient. Par l'un ou l'autre de ces procédés, on changerait de même la constitution de la vapeur, eu égard au poids donné d'eau et à la quantité de calorique qu'elle contiendrait, si elle avait été produite dans les circonstances requises pour la saturation de l'espace.

Jusqu'ici nous avons considéré la vapeur dans le vide et se formant dans le vide ; nous ne pouvons nous dispenser maintenant de chercher quelle influence l'air, renfermé dans un récipient, peut avoir sur sa formation, et quelle modification il peut apporter dans ses qualités mécaniques.

Ceci est d'autant plus important que, dans l'usage de la vapeur comme puissance motrice, il n'arrive peut-être jamais que l'air n'y soit mêlé dans des proportions plus ou moins fortes. L'eau elle-même en contient qui se dégage nécessairement dans l'ébullition et vient quelquefois porter le trouble dans les fonctions d'une machine à vapeur, dont le vide partiel dans le condenseur est une des conditions de son mouvement.

Supposons donc que le récipient, dont il a été question plus haut, soit plein d'air à o degré de température, et le petit réservoir plein d'eau; supposons encore que le récipient ait été fermé tout simplement à l'air libre, sous la pression moyenne de 76 centimètres. L'air contenu dans le récipient exercera sur la surface de l'eau du réservoir la même pression que celui dont il faisait partie dans l'atmosphère, c'est-à-dire une pression de 76 centimètres.

L'expérience prouve que la présence de l'air dans le récipient n'empêche pas plus la formation de la vapeur qu'il ne l'empêche dans un vase tout ouvert : la seule différence qu'il y ait entre la vaporisation dans le vide et celle qui a lieu dans l'air, c'est que dans le premier cas elle est presqu'instantanée, et dans le second, très-lente.

Bien différent d'un corps liquide ou solide, l'air, introduit dans un récipient, laisse entre les molécules qui le composent assez d'espace pour y recevoir celles de la vapeur qui se forme, et pour n'apporter aucun obstacle à ce que la vapeur vienne

saturer l'espace au bout de quelque temps, comme elle le ferait très-rapidement si l'espace était vide.

L'expérience prouve encore qu'il résulte du mélange de l'air et de la vapeur, dans notre récipient, une tension égale à la somme des tensions respectives et de l'air et de la vapeur, pris isolément; qu'ainsi, d'après notre supposition, la tension de l'air est de 76 centimètres de mercure dans le récipient, mais lorsque la vapeur à 0 degré sature l'espace, la tension devient égale à 76 centimètres + 5$^{mil.}$059, ou 765 millimètres.

Échauffez le récipient à des degrés quelconques, la vapeur se formera et saturera l'espace comme si le récipient était vide; mais il ne règne plus dans celui-ci la seule tension de la vapeur, tension correspondante aux divers degrés de température auxquels on l'a élevée, mais encore celle qui appartient à l'air échauffé à ces divers degrés, comme nous venons de le dire.

Quelle que soit la compression ou la raréfaction de l'air introduit, la formation de la vapeur et la saturation de l'espace, à toutes les températures, ont lieu comme dans le vide; et vous ôteriez du récipient ou vous y ajouteriez de l'air, que ces phénomènes ne changeraient pas; vous augmenteriez seulement ou vous diminueriez la part qu'aurait l'air dans la tension commune du mélange.

Cependant le mélange de l'air et de la vapeur s'étant fait dans le récipient, et l'espace y étant saturé, soutirez-en une portion de ce mélange : pour ce qui regarde l'air, vous l'avez raréfié, et pour ce qui regarde l'espace et la vapeur, il n'y a plus de saturation, puisque vous avez emporté avec l'air une portion de vapeur nécessaire à cette saturation. Il se reformera donc incontinent une nouvelle quantité de vapeur pour la compléter.

Mais puisque vous avez raréfié l'air, vous avez diminué sa tension; et quant à la tension de la vapeur, en définitif elle n'a point changé, attendu qu'une portion nouvelle de vapeur a remplacé celle que vous aviez soutirée. La tension commune s'est donc affaiblie, mais seulement pour la part que l'air y prend. Vous obtiendriez le même effet en agrandissant tout à coup le récipient.

Vous voyez que jusqu'à présent la vapeur se conduit, sauf la promptitude de sa formation, dans un récipient plein d'air, comme dans le vide; nous allons remarquer quelques différences.

Vous savez que dans le vide on peut, par une pression suffisante, ramener toute la vapeur à l'état liquide; on ne le peut pas lorsqu'elle est mêlée avec l'air.

Diminuez donc graduellement les dimensions du récipient : du moment que l'espace tendra à se sursaturer de la vapeur existante, une portion de celle-ci repassera à l'état liquide. Sa tension restera la même, et celle de l'air augmentera en raison inverse du volume qu'on lui donnera, ainsi que nous l'avons vu en son lieu; mais comme l'air ne peut pas perdre sa forme fluide, sa constitution primitive, quelle que soit la réduction de son volume, il contiendra toujours une portion de vapeur, qu'il défendra contre toute action comprimante. L'interposition des molécules de l'air entre les molécules de vapeur semble tenir celles-ci à une telle distance les unes des autres, qu'elles ne peuvent se réunir, comme elles pourraient le faire dans le vide, sans cette pression.

Il n'est pas inutile de remarquer ici que, comme l'air de notre récipient exerce une pression de 76 centimètres, il faut y employer une pression étrangère supérieure pour réduire son volume. Or, bien que la vapeur qui y est mêlée n'exerce

qu'une tension de 5 mil., 059, elle résiste cependant, au moyen de l'air, à une pression étrangère quelconque au-dessous de 76 centimètres, et ce n'est qu'au moment où le volume de l'air diminue, qu'une portion de vapeur repasse à l'état liquide.

Nous conclurons de ces observations, avec M. Biot (voy. *son Traité de Physique*), que la quantité de vapeur qui peut subsister à l'état aëriforme dans un volume d'air, est toujours exactement la même qu'elle sera dans le vide, à la même température. Que si l'on dilate le mélange, ou qu'on le comprime, la température restant constante, la force élastique de l'air varie selon la loi de Mariotte, c'est-à-dire en raison inverse du volume qu'on lui fait occuper; mais celle de la vapeur reste constante, quel que soit l'espace, tant qu'il y a du liquide à vaporiser, et alors elle est la même que dans le vide. Si la vaporisation n'est pas complète, la force élastique de la vapeur augmente avec la pression, comme celle de l'air ou d'un gaz, jusqu'à ce que la vapeur soit assez condensée pour que la liquéfaction ait lieu. Dans tous les cas, les forces élastiques de la vapeur et de l'air s'ajoutent pour former la force élastique totale du mélange. Ces phénomènes sont les mêmes pour tous les gaz, et aussi ils se passent exactement comme s'il n'y avait aucune affinité sensible entre les gaz et les vapeurs qui constituent un mélange aëriforme. L'unique effet qui résulte de l'interposition du gaz parmi les molécules de vapeur, c'est d'empêcher celles-ci de céder à la pression extérieure, et de se réunir en gouttes liquides, comme elles le feraient si elles étaient soumises seules à la même pression.

CHAPITRE XXXIX.

De la mesure de la tension de la vapeur à différens degrés de température.

Nous avons maintenant à donner les résultats des recherches faites dans la vue de déterminer les divers degrés de tension de la vapeur, ainsi que sa densité à différens degrés de température.

Plusieurs physiciens se sont livrés à ces recherches; nous citerons, pour le moment, M. Dalton, en Angleterre, et M. de Bettancourt, en France.

Voici comment M. Dalton procéda : il prit un baromètre de grandeur ordinaire, et, après avoir fait bouillir le mercure pour en chasser tout l'air, et humecté d'un peu d'eau les parois intérieures du tube, il introduisit le mercure dans celui-ci, et le renversa sur une cuvette, comme on le fait pour construire un baromètre. L'eau, comme plus légère que le mercure, vint surnager au-dessus du mercure, dans la partie vide du tuyau; la couche d'eau était d'environ un 8e. *de ligne* d'épaisseur, mesure anglaise, comme tout ce qui va suivre.

Il renferma ensuite la portion supérieure de ce tube barométrique dans un autre tube de verre de 14 *pouces* de hauteur sur 2 *pouces* de diamètre. Ces deux tubes laissaient entre eux, de cette manière, un espace annulaire destiné à contenir de l'eau qu'on y versait à différens degrés de tem-

pérature. Un thermomètre, plongé dans cette eau, en marquait les degrés de chaleur, et on évaluait la tension de la vapeur fournie par la petite couche d'eau dans le vide du tube, par le degré d'abaissement de la colonne de mercure.

On se servit de cet appareil pour toutes les températures au-dessous de 155 degrés de Fahrenheit (68° $\frac{1}{3}$ centigrades), et pour les températures plus élevées, pour celle de 212 degrés de Farhenheit (100 degrés centigrades) par exemple, on emploie un tube extérieur de fer-blanc, et au lieu du premier tube barométrique, un siphon renversé.

M. Dalton trouva que les résultats offerts par les appareils précédens s'accordaient parfaitement avec une suite d'expériences qu'il fit de la manière suivante, avec une pompe pneumatique pourvue d'un manomètre d'une assez grande capacité : on fesait bouillir de l'eau dans une fiole portant un thermomètre; on l'introduisait sous le récipient de la machine pneumatique, dans lequel on avait préalablement fait le vide, et la colonne de mercure du manomètre indiquait les degrés de tension qui correspondaient à la température de l'eau dans la bouteille.

C'est d'après les faits observés dans ces deux séries d'expériences, que M. Dalton composa la table que nous allons donner, et que nous avons extraite de l'*Encyclopédie anglaise* de Rées. Il trouva que les hauteurs du mercure dans le tube, correspondantes aux degrés de température, n'étaient pas dans un rapport constant, et ne variaient point suivant une progression régulière : lorsque les degrés de température étaient entre eux dans une progression arithmétique, les colonnes de mercure qui en dépendaient étaient à peu près entre elles dans une progression géométrique.

L'accroissement de ces rapports, bien qu'il ne fût pas ri-

goureusement géométrique, diminuait cependant d'une manière régulière; ce qui lui fit penser qu'il pouvait calculer avec assez d'exactitude les termes qu'il ne pouvait pas, au moyen de ses appareils, déterminer par des expériences directes.

On trouve rarement, dit M. Dalton, une loi de la nature accompagnée d'aussi peu d'incertitude que celle-là; et les petites irrégularités qu'on remarque viennent de l'échelle imparfaite de nos thermomètres, qui, suivant la remarque de Deluc et de plusieurs autres savans, ne marquent pas des accroissemens égaux de chaleur.

PREMIÈRE TABLE

De la force de la vapeur pour chaque degré de température, depuis 40 degrés au-dessous de o *Fahrenheit : (*40 *degrés au-dessous de* o *centigrades :) jusqu'à* 325 *degrés Fahrenheit, d'après M. Dalton. On y a ajouté le poids de la vapeur à diverses températures.*

Température centigrade.	Température Fahrenheit.	FORCE de la vapeur exprimée en pouces de mercure.	POIDS de la vapeur dans un pied cube d'espace en grains.	Température centigrade.	Température Fahrenheit.	FORCE de la vapeur exprimée en pouces de mercure.	POIDS de la vapeur dans un pied cube d'espace en grains.
Degrés.	Degrés.			Degrés.	Degrés.		
—40	—40	0,013	0, 1096	0	+32	0,200	1,686
$-34\frac{4}{9}$	—30	0,028	0, 1686		33	0,207	1,745
$-28\frac{8}{9}$	—20	0,030	0, 2530		34	0,214	1,804
$-23\frac{1}{3}$	—10	0,043	0, 3626		35	0,221	1,863
$-17\frac{7}{9}$	0	0,064	0, 5397		36	0,229	1,931
	+ 1	0,066	0, 5566		37	0,237	1,998
	2	0,068	0, 5734		38	0,245	2,066
	3	0,071	0, 5987		39	0,254	2,142
	4	0,074	0, 6274		40	0,263	2,217
—15	+ 5	0,076	0, 6409	+ 5	41	0,273	2,302
	6	0,079	0, 6666		42	0,283	2,353
	7	0,082	0, 6915		43	0,294	2,479
	8	0,085	0, 7168		44	0,305	2,572
	9	0,087	0, 7337		45	0,316	2,664
	10	0,090	0, 7590		46	0,328	2,762
	11	0,093	0, 7843		47	0,339	2,858
	12	0,096	0, 8096		48	0,351	2,960
	13	0,100	0, 8433		49	0,363	3,061
—10	14	0,104	0, 8773	+10	50	0,375	3,162
	15	0,108	0, 9114		51	0,388	3,238
	16	0,112	0, 9445		52	0,401	3,457
	17	0,116	0, 9782		53	0,415	3,499
	18	0,120	1,0120		54	0,429	3,617
	19	0,124	1,0457		55	0,443	3,735
	20	0,129	1,0878		56	0,458	3,862
	21	0,131	1,130		57	0,474	3,997
	22	0,139	1,172		58	0,490	4,130
— 5	+23	0,144	1,214	—15	59	0,507	4,242
	24	0,150	1,265		60	0,524	4,419
	25	0,156	1,315		61	0,542	4,540
	26	0,162	1,366		62	0,560	4,722
	27	0,168	1,416		63	0,578	4,874
	28	0,174	1,467		64	0,597	5,034
	29	0,180	1,518		65	0,616	5,194
	30	0,186	1,568		66	0,635	5,355
	31	0,193	1,620		67	0,655	5,523

Température centigrade.	Température Fahrenheit.	FORCE de la vapeur exprimée en *pouces* de mercure.	POIDS de la vapeur dans un *pied* cube d'espace en *grains*.	Température centigrade.	Température Fahrenheit.	FORCE de la vapeur exprimée en *pouces* de mercure.	POIDS de la vapeur dans un *pied* cube d'espace en *grains*.
Degrés.	Degrés.			Degrés.	Degrés.		
20	68	0,676	5,700		114	2,84	23,95
	69	0,698	5,886		115	2,92	24,39
	70	0,721	6,002		116	3,00	25,30
	71	0,745	6,283		117	3,08	25,97
	72	0,770	6,490		118	3,16	26,31
	73	0,796	6,712		119	3,25	27,40
	74	0,823	6,940		120	3,33	28,08
	75	0,851	7,176		121	3,42	28,84
	76	0,880	7,421	50	122	3,50	29,51
25	77	0,908	7,677		123	3,59	30,17
	78	0,940	7,894		124	3,69	31,11
	79	0,971	8,183		125	3,79	31,99
	80	1,000	8,466		126	3,89	32,80
	81	1,04	8,770		127	4,00	33,73
	82	1,07	9,023		128	4,11	34,86
	83	1,10	9,276		129	4,22	35,58
	84	1,14	9,614		130	4,34	36,58
	85	1,17	9,867	55	131	4,47	37,69
30	86	1,21	10,20		132	4,60	38,79
	87	1,24	10,45		133	4,73	39,88
	88	1,28	10,79		134	4,06	40,98
	89	1,32	11,13		135	5,00	42,16
	90	1,36	11,46		136	5,14	43,34
	91	1,40	11,80		137	5,29	44,61
	92	1,44	12,14		138	5,44	45,87
	93	1,48	12,48		139	5,59	47,14
	94	1,53	12,90	60	140	5,74	48,40
35	95	1,58	13,32		141	5,90	49,75
	96	1,63	13,75		142	6,05	50,31
	97	1,68	14,16		143	6,21	51,37
	98	1,74	14,68		144	6,37	53,72
	99	1,80	15,18		145	6,53	55,06
	108	1,86	15,68		146	6,70	56,63
	101	1,92	16,19		147	6,87	57,33
	102	1,98	16,69		148	7,05	59,45
	103	2,04	17,20	65	149	7,23	60,97
40	104	2,11	17,79		150	7,42	62,57
	105	2,18	18,79		151	7,61	64,17
	106	2,25	18,97		152	7,81	65,86
	107	2,32	19,55		153	8,01	67,55
	108	2,39	20,15		154	8,20	69,15
	109	2,46	20,74		155	8,40	70,84
	110	2,53	21,33		156	8,60	72,52
	111	2,60	21,92		157	8,81	74,29
	112	2,68	22,26	70	158	9,02	76,06
45	113	2,76	23,24		159	9,24	77,72

Température centigrade.	Température Fahrenheit.	FORCE de la vapeur exprimée en *pouces* de mercure.	POIDS de la vapeur dans un *pied* cube d'espace en *grains*.	Température centigrade.	Température Fahrenheit.	FORCE de la vapeur exprimée en *pouces* de mercure.	POIDS de la vapeur dans un *pied* cube d'espace en *grains*.
Degres.	Degrés.			Degrés.	Degrés.		
	160	9,46	79,77		206	26,66	224,83
	161	9,68	82,63		207	27,20	229,38
	162	9,91	83,57		208	27,74	233,94
	163	10,15	84,45		209	28,20	237,82
	164	10,41	88,04		210	28,84	243,21
	165	10,68	90,07		211	29,41	248,02
	166	10,96	91,76	100	212	30,00	253,00
75	167	11,25	94,87		213	30,60	258,06
	168	11,54	97,32		214	31,21	263,20
	169	11,83	99,76		215	31,83	267,39
	170	12,13	102,96		216	32,46	272,74
	171	12,43	104,45		217	33,09	278,72
	172	12,73	107,34		218	33,72	284,37
	173	13,02	109,73		219	34,35	289,68
	174	13,32	112,32		220	34,99	295,88
	175	13,62	114,52	105	221	35,63	300,81
80	176	13,92	117,39		222	36,25	305,70
	177	14,22	120,58		223	36,88	311,02
	178	14,52	122,45		224	37,53	316,50
	179	14,83	126,06		225	38,20	322,15
	180	15,15	127,76		226	38,89	327,63
	181	15,50	130,71		227	39,59	333,87
	182	15,86	133,75		228	40,30	339,86
	183	16,23	136,87		229	41,02	345.92
	184	16,61	141,41	110	230	41,75	352,09
85	185	17,00	143,36		231	42,49	358,37
	186	17,40	145,17		232	43,24	364,65
	187	17,80	148,51		233	44,00	371,06
	188	18,20	153,48		234	44,78	377,64
	189	18,60	156,86		235	45,58	384,39
	190	19,00	160,23		236	46,39	391,22
	191	19,42	163,77		237	47,20	398,05
	192	19,86	167,48		238	48,02	404,96
	193	20,32	171,36	115	239	48,84	411,88
90	194	20,77	175,16		240	49,67	418,88
	195	21,22	178,95		241	50,50	425,18
	196	21,68	182,83		242	51,34	432,96
	197	22,13	186,62		243	52,18	440,05
	198	22,69	190,62		244	53,03	447,21
	199	23,16	195,98		245	53,88	454,38
	200	23,64	199,36		246	54.68	461,13
	201	24,12	202,41		247	55,64	468,35
	202	24,61	207,54	120	248	56,42	476,26
95	203	25,10	211,67		249	57,31	482,96
	204	25,61	215.31		250	58,21	489,90
	205	26,36	220,36		251	59,12	496,91

Température centigrade.	Température Fahrenheit.	FORCE de la vapeur exprimée en pouces de mercure.	POIDS de la vapeur dans un pied cube d'espace en grains.	Température centigrade.	Température Fahrenheit.	FORCE de la vapeur exprimée en pouces de mercure.	POIDS de la vapeur dans un pied cube d'espace en grains.
Degrés.	Degrés.			Degrés.	Degrés.		
	252	60,05	506,42		289	98,96	834,56
	253	61,00	514,43		290	100,12	844,34
	254	61,92	522,19		291	101,28	854,12
	255	62,85	530,33		292	102,45	863,99
	256	63,76	537,70	145	293	103,63	873,94
125	257	64,82	546,63		294	104,80	883,81
	258	65,78	554,74		295	105,97	893,68
	259	66,75	562,92		296	107,14	903,54
	260	67,73	571,18		297	108,31	913,41
	261	68,72	579,53		298	109,48	923,28
	262	69,72	587,97		299	110,64	933,06
	263	70,73	596,48		300	111,81	942,93
	264	71,74	605,00		301	112,98	952,79
	265	72,76	613,60	150	302	114,15	962,99
130	266	73,77	622,10		303	115,32	972,53
	267	74,79	630,72		304	116,50	982,15
	268	75,80	639,24		305	117,68	992,43
	269	76,82	647,84		306	118,86	1002,38
	270	77,85	656,53		307	120,03	1014,53
	271	78,89	665,30		308	121,20	1020,12
	272	79,94	674,16		309	122,33	1034,98
	273	80,98	682,93		310	123,53	1041,76
	274	82,10	692,37	155	311	124,69	1051,55
135	275	83,13	701,06		312	125,85	1061,36
	276	84,35	711,38		313	127,00	1071,03
	277	85,47	720,79		314	128,15	1080,73
	278	86,50	729,48		315	129,29	1090,14
	279	87,63	739,01		316	130,43	1099,95
	280	88,75	748,47		317	131,57	1109,57
	281	89,87	757,90		318	132,72	1119,27
	282	90,99	767,34		319	133,86	1125,55
	283	92,11	776,97	160	320	135,00	1138,50
140	284	93,23	786,23		321	136,14	1148,11
	285	94,35	795,68		322	137,28	1157,72
	286	95,48	805,21		323	138,42	1167,34
	287	96,64	814,33		324	139,56	1176,95
	288	97,80	824,78		325	140,70	1186,57(1)

(1) Pour convertir les degrés de Fahrenheit en degrés centigrades, et réciproquement, il faut savoir que le zéro du thermomètre centigrade, ou la glace fondante, répond à 32 degrés de Fahrenheit, et qu'au terme de l'ébullition de l'eau, le thermomètre centigrade marque 100 degrés, tandis que celui de Fahrenheit indique 212 degrés. Ainsi 100 degrés centigrades font 180 degrés de Fahrenheit, ce qui donne 5 degrés centigrades pour 9 degrés de Fahrenheit.

Cette table, depuis 30 degrés de Fahrenheit jusqu'à 212 degrés, est, dit l'auteur de l'article que nous extrayons, le résultat des expériences les plus soignées. Les degrés au-dessus et au-dessous *n'ont été déterminés que par le calcul, et sont,* ajoute-t-il, *beaucoup plus exacts que les degrés trouvés par l'expérience,* à raison des grandes difficultés et de l'incertitude qu'occasioneraient les hautes et les basses températures.

L'auteur cité ci-dessus a jugé convenable d'ajouter une troisième colonne à la table de M. Dalton, pour donner le poids de la vapeur contenue dans un *pied cube* anglais d'espace, lorsqu'il y a une quantité d'eau suffisante pour la température donnée.

Cette colonne a été dressée d'après ce fait que, lorsque la force de la vapeur est de 30 *pouces* anglais de hauteur

---

Si vous avez plus de 32 de Fahrenheit *au-dessus* de zéro, ôtez-en 32, multipliez le reste par 5, et divisez le produit par 9 : le quotient donnera les degrés centigrades correspondans. Si vous avez moins de 32 degrés au-dessus de zéro, ôtez ce nombre de 32 ; multipliez le reste par 5, et divisez le produit par 9 : vous aurez les degrés centigrades correspondans, mais *au-dessous* de zéro. Enfin si la température est donnée en degrés de Fahrenheit *au-dessous* de zéro, ajoutez 32 à ce nombre de degrés, multipliez la somme par 5 et divisez le produit par 9 : ce sera le nombre de degrés centigrades *au-dessous* de zéro. Exemples : 1°. on a 68 degrés de Fahrenheit, ôtez 32, il reste 36 ; multipliez par 5 et ensuite divisez le produit 180 par 9, le quotient 20 désigne 20 degrés centigrades. Un calcul semblable donne $+11°\frac{1}{9}$ centigrades pour 52 degrés de Fahrenheit ; 2°. si l'on a +14 degrés Fahrenheit, on ôte 14 de 32, il reste 18 ; on multiplie 18 par 5, et on divise le produit 90 par 9 ; on trouve 10 degrés centigrades *au-dessous* de zéro, ou —10 degrés ; de même +10 degrés Fahreinheit font $-12°\frac{2}{9}$ centigrades ; 3°. enfin —40 degrés Fahrenheit $=-(10+32)\frac{5}{9}=-40$ degrés centigrades, température où le mercure gèle.

Comme cette table est en mesures anglaises, nous donnons ici les mesures métriques correspondantes : 1 *pouce anglais* répond à $25^{mil.},3997$; 5 *pouces* à $126^{mil.},999$; 7 *pouces* à 177,798 ; et 8 *pouces* à 203,198.

Le *pied cube* anglais équivaut à $28^{décim\ cubes},3153$; le *grain* troy anglais vaut $64^{milligrammes},74$; 3 *grains*$=194^{millig.},22$; 5 *grains*$=323^{mil.},70$; 7 *grains*$=453^{mil.},18$; 8 *grains*$=517^{mil.},92$.

de mercure, le *pied cube* anglais de cette vapeur pèse 253 *grains*, et, en admettant que la densité soit comme la pression, on a cette proportion : 30 *pouces* sont à 253 *grains*, comme la force de la vapeur de tout autre degré, aussi exprimée en *pouces*, est au nombre de *grains* qui en exprime le poids, par *pied cube*.

Nous avons cru utile de réduire une partie de la table de M. Dalton, en mesures métriques, ainsi qu'il suit :

DEUXIÈME TABLE.

TEMPÉRATURE centigrade.	COLONNE DE MERCURE exprimée en millimètres représentant la tension de la vapeur.	PRESSION de la vapeur sur un centimètre carré de surface.	POIDS DE LA VAPEUR	
			Par décimètre cube.	Par mètre cube.
Degrés.	Millimètres.	Kilogrammes.	Milligrammes.	Grammes.
30	30, 733	»	»	
35	40, 131	»	»	
40	53, 593	»	»	
45	70, 103	»	»	
50	88, 899	»	»	
55	113, 537	»	»	
60	145, 795	»	»	»
65	183, 630	»	»	»
70	229, 105	»	»	»
75	285, 746	»	»	»
80	353, 564	»	»	»
85	431, 791	»	»	»
90	527, 552	»	»	»
95	637, 533	»	»	»
100	761, 991	1, 035	578	578
105	904, 991	1, 230	687	687
110	1060, 437	1, 441	805	805
115	1240, 521	1, 685	941	941
120	1433, 051	1, 947	1088	1088
125	1646, 409	2, 236	1250	1250
130	1873, 736	2, 546	1422	1422
135	2111, 477	2, 869	1602	1602
140	2368, 014	3, 217	1800	1800
145	2632, 171	3, 576	2000	2000
150	2899, 376	3, 939	2201	2201
155	3167, 089	4, 302	2404	2404
160	3428, 960	4, 658	2603	2603

Si l'on divise le second terme de la seconde colonne de la table ci-dessus, par le premier, le troisième par le second, le quatrième par le troisième, et ainsi de suite, on trouvera, conformément à la remarque de l'auteur cité, que les rapports vont en diminuant d'une manière assez régulière, bien que la température augmente en progression arithmétique; et cette diminution est tellement rapide, qu'on serait en droit de conclure que la tension de la vapeur diminuerait bien plutôt que d'augmenter, avant d'arriver à 180 degrés centigrades; c'est-à-dire qu'en augmentant progressivement la quantité des élémens de la force de la vapeur qui, comme on sait, sont le calorique et l'eau, vous arriveriez à un point où cette force s'affaiblirait. Cette conclusion qui découle naturellement de la table de M. Dalton, paraît évidemment insoutenable. Il est vrai de dire que les tensions correspondantes aux degrés supérieurs à 100 degrés centigrades ont été trouvées par le calcul, et que ce calcul, manquant de données suffisantes, a pu fournir des résultats inexacts; c'est au moins ce que montrent les expériences directes que nous avons faites nous-mêmes, et dont il sera question plus loin.

Les expériences de M. de Betancourt sur la force de la vapeur furent présentées à l'Académie royale des Sciences en 1790. L'appareil dont il se servit était composé d'une chaudière de cuivre d'une *ligne* d'épaisseur: le couvercle était soudé au corps de la chaudière avec de la soudure forte. L'auteur ne se décida pour ce genre de soudure qu'après plusieurs tentatives infructueuses, et après avoir reconnu que la soudure à l'étain donnait passage à la vapeur, surtout dans les températures élevées.

Le couvercle était percé de trois ouvertures qui se fermaient à vis; la première était destinée à donner passage à

l'eau que l'on devait introduire dans la petite chaudière, ou que l'on devait en retirer pour les différentes expériences ; la seconde donnait passage à la tige d'un thermomètre dont la graduation *à l'échelle de Réaumur* était toute en dehors, et dont la boule, située en dedans, plongeait ou dans l'eau ou dans la vapeur ; par la troisième, passait un tube qui établissait une communication entre la capacité de la chaudière et une des branches d'un siphon renversé qui, contenant du mercure et faisant fonction de baromètre, était destiné à mesurer la force de la vapeur. Indépendamment de ces trois ouvertures, il y en avait une quatrième latérale par laquelle on pouvait, au moyen d'un robinet, établir ou interrompre à volonté la communication avec le récipient d'une machine pneumatique, pour extraire l'air qui était dans la chaudière.

Dans les premiers essais que fit M. de Betancourt, la seconde branche du siphon, faisant fonction de baromètre, était ouverte par en haut ; ainsi la hauteur du mercure dans cette branche ne dépendait pas seulement du ressort de la vapeur dans l'intérieur de la chaudière ; elle dépendait encore de la pression actuelle de l'atmosphère ; ce qui assujettissait les résultats des expériences à des corrections tirées de la hauteur du mercure dans le baromètre de l'appartement.

L'auteur se délivra de ces observations subsidiaires et des corrections auxquelles elles étaient destinées, en fermant par en haut la seconde branche de son siphon ; ce qui l'obligea à donner à cette branche verticale une grande hauteur, afin de remplacer la pression de l'atmosphère par une colonne de mercure du même poids.

Cet appareil étant monté, et l'eau distillée ayant été introduite dans la chaudière, M. de Betancourt entoura de

glace sa chaudière, afin d'abaisser la température de l'eau à celle de la glace fondante; et il fit le vide, au moyen de la machine pneumatique, jusqu'à ce que, continuant de pomper, le mercure cessât de descendre dans la seconde branche du siphon. Alors la différence du mercure dans les deux branches était due au ressort de la vapeur qui se dégage de l'eau à cette température. Puis, en plaçant du feu sous la chaudière, il éleva graduellement la température de l'eau depuis zéro jusqu'à 110 degrés de *Réaumur*, et, pour chacun des degrés d'élévation de température, il observa la hauteur de la colonne de mercure qui mesurait le ressort de la vapeur.

L'auteur fit varier la quantité d'eau introduite dans la chaudière; et il remarqua que, quand cette quantité était assez petite pour que la boule du thermomètre ne fût pas plongée dans l'eau, mais qu'elle fût partout entourée de vapeur, le thermomètre indiquait, pour une même force de tension, une température plus basse; l'auteur attribuait ce phénomène à ce que le thermomètre emploie plus de temps pour acquérir une certaine température dans un fluide rare, comme la vapeur, que dans l'eau dont la densité est beaucoup plus grande. Ainsi, par exemple, lorsque l'eau n'occupait que le vingtième de la capacité de la chaudière, la tension de la vapeur, pour 80 degrés de *Réaumur*, était de 31^{pouces}, 4; et lorsque le volume de l'eau était les trois quarts de celui de la chaudière, le thermomètre indiquant d'ailleurs la même température, la force n'était que de 28 *pouces*.

Les résultats des expériences de M. de Betancourt sont compris, ainsi qu'on le voit dans la table suivante, en quatre colonnes, dont chacune est relative à un certain volume d'eau introduit dans la chaudière.

EXPÉRIENCES DE M. DE BETANCOURT,

Sur la force de tension de la vapeur, à différens degrés du thermomètre de Réaumur.

TEMPÉRATURE.	HAUTEUR de la colonne de mercure soutenue par la tension de la vapeur, en centièmes de pouce.			
	La vingtième partie d'eau dans la chaudière.	La quatrième partie d'eau dans la chaudière.	La moitié d'eau dans la chaudière.	Les trois quarts d'eau dans la chaudière.
Degrés.				
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,05	0,02	0,02	0,00
4	0,07	0,05	0,05	0,02
5	0,09	0,10	0,05	0,02
6	0,10	0,12	0,07	0,05
7	0,12	0,15	0,10	0,07
8	0,12	0,20	0,13	0,10
9	0,13	0,25	0,15	0,12
10	0,15	0,27	0,17	0,15
11	0,17	0,30	0,17	0,18
12	0,20	0,33	0,20	0,22
13	0,22	0,37	0,25	0,27
14	0,25	0,40	0,30	0,30
15	0,28	0,45	0,35	0,35
16	0,32	0,50	0,40	0,40
17	0,37	0,55	0,45	0,45
18	0,40	0,60	0,50	0,52
19	0,42	0,67	0,55	0,58
20	0,47	0,75	0,62	0,65
21	0,55	0,77	0,70	0,75
22	0,65	0,85	0,77	0,82
23	0,70	0,92	0,85	0,92
24	0,75	0,97	0,92	0,97
25	0,82	1,00	1,00	1,05
26	0,90	1,07	1,10	1,12
27	0,95	1,20	1,20	1,22
28	1,05	1,30	1,27	1,32
29	1,15	1,40	1,37	1,42
30	1,25	1,52	1,50	1,52
31	1,35	1,62	1,62	1,65
32	1,47	1,75	1,75	1,78
33	1,60	1,87	1,85	1,90
34	1,72	2,00	1,97	2,00

TEMPÉRATURE.	HAUTEUR de la colonne de mercure soutenue par la tension de la vapeur, en centièmes de pouce.			
	La vingtième partie d'eau dans la chaudière.	La quatrième partie d'eau dans la chaudière.	La moitié d'eau dans la chaudière.	Les trois quarts d'eau dans la chaudière.
Degrés.				
35	1,85	2,15	2,12	2,15
36	2,00	2,30	2,25	2,27
37	2,12	2,45	2,45	2,45
38	2,30	2,65	2,57	2,57
39	2,50	2,80	2,75	2,75
40	2,70	2,97	2,90	2,92
41	2,90	3,15	3,10	3,10
42	3,10	3,35	3,30	3,27
43	3,30	3,60	3,50	3,47
44	3,50	3,85	3,75	3,70
45	3,75	4,10	4,00	3,95
46	4,00	4,35	4,22	4,25
47	4,30	4,65	4,50	4,45
48	4,70	4,95	4,80	4,75
49	5,17	5,25	5,10	5,00
50	5,75	5,60	5,50	5,35
51	6,20	5,95	5,85	5,70
52	6,75	6,40	6,20	6,05
53	7,25	6,80	6,60	6,50
54	7,85	7,30	7,00	6,90
55	8,30	7,80	7,55	7,32
56	8,95	8,35	8,05	7,85
57	9,70	8,85	8,60	8,40
58	10,30	9,45	9,10	8,85
59	10,80	9,90	9,60	9,35
60	11,40	10,35	10,10	9,95
61	12,20	10,90	10,60	10,40
62	12,90	11,50	11,25	11,00
63	13,70	12,25	11,95	11,70
64	14,45	12,90	12,55	12,40
65	15,30	13,70	13,25	13,20
66	16,00	14,35	13,95	13,80
67	16,85	15,10	14,70	14,50
68	17,70	15,90	15,50	15,25
69	18,60	16,70	16,30	16,10
70	19,50	17,50	17,50	16,90
71	20,45	18,40	18,00	17,80
72	21,45	19,40	19,00	18,70
73	22,50	20,60	20,10	19,50
74	23,60	21,70	21,20	20,60

TEMPÉRATURE.	HAUTEUR de la colonne de mercure soutenue par la tension de la vapeur, en centièmes de pouce.			
	La vingtième partie d'eau dans la chaudière.	La quatrième partie d'eau dans la chaudière.	La moitié d'eau dans la chaudière.	Les trois quarts d'eau dans la chaudière.
Degrés.				
75	24,80	22,80	22,35	21,75
76	26,10	24,00	23,50	22,90
77	27,35	25,35	24,80	24,15
78	28,50	26,50	26,00	25,50
79	29,90	27,80	27,30	26,67
80	31,40	29,00	28,60	28,00
81	32,90	30,90	30,40	29,60
82	34,60	32,50	31,50	31,30
83	36,00	34,10	33,60	33,00
84	38,00	36,00	35,30	34,60
85	39,90	37,70	37,00	36,45
86	41,80	39,60	38,90	38,10
87	43,70	41,40	40,90	40,00
88	45,50	43,60	43,00	42,20
89	47,50	45,60	45,00	44,30
90	49,70	47,80	47,20	46,40
91	51,90	50,10	49,40	48,40
92	54,20	52,20	51,50	50,50
93	56,60	54,30	53,70	53,00
94	58,80	56,80	55,90	55,30
95	61,20	59,20	58,20	57,80
96	63,60	61,80	60,90	60,50
97	66,10	64,00	63,80	63,40
98	69,60	67,00	66,40	66,20
99	72,00	70,00	69,60	69,00
100	75,00	73,00	72,40	71,80
101	78,00	75,80	74,50	75,00
102	80,50	77,60	77,00	78,20
103	83,80	80,00	79,40	81,00
104	86,00	82,80	82,40	84,00
105	89,00	85,80	84,90	86,80
106	91,50	88,01	87,00	89,00
107	93,50	90,60	89,80	91,30
108	96,00	93,30	92,00	93,50
109	99,00	96,00	94,50	95,60
110	102,50	99,00	98,00	98,00

Nous réduirons quelques nombres de cette table à l'échelle centigrade et à la pression sur un centimètre carré de surface, exprimés en kilogrammes, afin qu'on puisse comparer les résultats de ces expériences avec les précédentes et celles qui vont suivre.

TABLE D'APRÈS BETANCOURT.

THERMOMÈTRE CENTIGRADE.	TENSION DE LA VAPEUR sur un centimètre carré de surface.
Degrés.	Kilogrammes.
100	1,027
106 $\frac{1}{4}$	1,337
112 $\frac{1}{2}$	1,637
118 $\frac{3}{4}$	2,119
125	2,622
131 $\frac{1}{4}$	3,184
137 $\frac{1}{2}$	3,594

On remarquera, dans les expériences de M. de Betancourt, comme dans celles de M. Dalton, que la marche de la température suit une progression arithmétique et que celle de la tension s'approche d'une progression géométrique; cependant les unes et les autres indiquent un décroissement dans les rapports qui lient les termes entre eux.

On voit en outre que les résultats obtenus par M. de Betancourt, dans les degrés élevés, attribuent à la vapeur une force de tension supérieure à celle que M. Dalton a déduite, par le calcul, d'expériences qui, comme nous l'avons dit, n'ont pas été poussées plus loin que 100 degrés centigrades.

A la vérité le vide ne pouvait être que partiel dans l'appareil de M. de Betancourt; il devait être complet dans celui de M. Dalton. La tension d'une portion d'air, dans le premier, s'est ajoutée à celle de la vapeur. Il est toutefois permis

de croire que les différences qu'on remarque dans les résultats obtenus par les deux procédés, ne viennent pas en totalité du concours de l'air dont on n'a pu débarrasser entièrement le premier appareil; il faut en attribuer une partie à ce que les uns ont été fournis par des expériences directes, et les autres, du mélange de quelque hypothèse avec des expériences pour ainsi dire indirectes.

La nature et la diversité des résultats obtenus par les deux observateurs que nous venons de citer, ainsi que par d'autres dont nous parlerons plus loin; en outre la nécessité de bien connaître la valeur d'une force dont les applications sont si importantes, nous ont déterminés à nous livrer à une suite de recherches sur ce sujet, recherches auxquelles nous nous sommes efforcés d'apporter le degré d'exactitude que la pratique peut exiger, et toute l'attention dont nous sommes capables.

Nouvelles expériences sur la tension de la vapeur.

Nous ne connaissons que deux moyens praticables de mesurer la tension de la vapeur à différens degrés de température : l'un consiste à mettre la vapeur en opposition avec une colonne de liquide, et l'autre à la faire agir sur une surface solide, mobile, sur un piston par exemple, que l'on met en équilibre avec les divers degrés de tension que la vapeur peut offrir.

Dans le premier procédé, on ne peut guère se servir que de mercure, principalement parce que la grande pesanteur spécifique de ce liquide dispense d'employer des tuyaux d'une élévation considérable pour contenir une colonne liquide capable, par sa hauteur, de résister à la pression de la vapeur, ne fût-ce même qu'à 100 degrés centigrades de température.

Encore serait-il difficile, avec le mercure, d'étendre les expériences au-delà du terme auquel M. de Betancourt s'est arrêté. Il importe cependant de faire prononcer l'expérience, sur la force de la vapeur, aux divers degrés de température auxquels cette force peut être portée dans le service industriel qu'on pourrait vouloir lui faire faire.

Dans le second procédé, l'on ne rencontre de limites aux expériences qu'on peut tenter, que celles mêmes de la force des capacités des vases dans lesquels on accumule la vapeur. D'ailleurs on y fait agir ce fluide précisément de la même manière qu'il agit dans les machines à vapeur, et dès-lors les expériences sont dans les mêmes conditions et accompagnées des mêmes circonstances que le service de cette force dans la pratique. C'est ce qui nous a déterminés à employer ce dernier procédé, ainsi que nous allons le décrire.

On a pris un vase de forme sphérique en cuivre rouge, d'environ quatre décimètres cubes de capacité. On y a pratiqué trois ouvertures : à la première était soudée une petite boîte à étoupes que traversait la tige d'un thermomètre centigrade, dont la boule pénétrait jusqu'au centre de la capacité; à la seconde on avait fixé un petit corps de pompe en cuivre, alaisé avec beaucoup de soin pour recevoir un piston solide d'acier, *rodé* avec exactitude, et de 9^{mil}, 3 de diamètre.

La tige de ce piston portait un plateau sur lequel on plaçait les poids nécessaires; ces poids étaient formés de rondelles de plomb laminé.

Le piston, sa tige et le plateau étaient tenus en équilibre, au milieu de la hauteur du corps de pompe, par un levier à contre-poids; celui-ci était seul suffisant pour soulever doucement le piston et vaincre les frottemens et l'inertie du piston avec sa tige et le plateau.

Un tube de cuivre, destiné à recevoir l'eau, a été fixé fortement à la troisième ouverture, opposée aux deux précédentes. C'est ce tube qu'on exposait à l'action du feu pour remplir le vase de vapeur.

Tout l'appareil a été recouvert d'une enveloppe de bois de chêne, charbonné en dedans, de telle manière qu'une grande partie du calorique qui se dégageait du fourneau, circulait à l'entour de la sphère.

On a apporté un soin extrême à tenir le petit piston bien graissé et bien libre de mouvement dans le corps de pompe.

On a mesuré les divers degrés de tension tantôt lorsque la température s'élevait, et tantôt lorsque, arrivé au terme qu'on a voulu atteindre, la température s'abaissait graduellement. Non seulement on a mis des poids déterminés pour connaître à quelle température la vapeur doit parvenir pour leur faire équilibre, mais on a observé encore quel poids il a fallu pour contre-balancer la force de la vapeur à divers degrés de température.

D'après la description de cet appareil, on conçoit que la vapeur avait en opposition la pression atmosphérique.

Pour vider l'appareil de l'air qu'il contenait, on laissait sortir, par le corps de pompe, un courant de vapeur, pendant quelques minutes.

Chaque expérience et même chaque série d'expériences ont été répétées plusieurs fois. La table suivante en donne les résultats.

PREMIÈRE TABLE.

1re. *Série d'expériences sur la force de tension de la vapeur, avec un piston de 9,3 millimètres de diamètre, dont la surface est de* 67 mil. carrés,929.

Baromètre 761 millimètres, pression atmosphérique sur la surface du piston 0 kil.,703.

TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de tension de la vapeur au-dessus de la pression atmosphérique.	FORCE de tension de la vapeur, en y comprenant celle qui fait equilibre à l'atmosphère ou *force sur le vide*.	PRESSION sur le vide par centimètre carré de surface.
Degrés.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.
110 $\frac{1}{2}$	0,3	1,003	1,478
113 $\frac{1}{2}$	0,4	1,103	1,625
116 $\frac{1}{4}$	0,5	1,203	1,773
120	0,6	1,303	1,920
122 $\frac{1}{2}$	0,7	1,403	2,067
124 $\frac{1}{4}$	0,8	1,503	2,214
126	0,9	1,603	2,361
128	1,0	1,703	2,509
130 $\frac{3}{4}$	1,1	1,803	2,656
132 $\frac{1}{4}$	1,2	1,903	2,803
134	1,3	2,003	2,950
135 $\frac{1}{2}$	1,4	2,103	3,097
137	1,5	2,203	3,245
138 $\frac{1}{2}$	1,6	2,303	3,392
139 $\frac{1}{2}$	1,7	2,403	3,539
141	1,8	2,503	3,686
142 $\frac{3}{4}$	1,9	2,603	3,838
143 $\frac{1}{2}$	2,0	2,703	3,981
145	2,1	2,803	4,128
146 $\frac{1}{2}$	2,2	2,903	4,275
148	2,3	3,003	4,422
149	2,4	3,103	4,569
150	2,5	3,203	4,717
Deuxième série d'expériences.			
105	0,1	0,803	1,184
108	0,2	0,903	1,331
111	0,3	1,003	1,478
114	0,4	1,103	1,625
117	0,5	1,203	1,772
119	0,6	1,303	1,919

TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de tension de la vapeur au-dessus de la pression atmosphérique.	FORCE de tension de la vapeur en y comprenant celle qui fait équilibre à l'atmosphère ou *force sur le vide*.	PRESSION sur le vide par centimètre carré de surface.
Degrés.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.
121 ½	0,7	1,403	2,067
123 ½	0,8	1,503	2,214
126	0,9	1,603	2,361
128	1,0	1,703	2,508
130	1,1	1,803	2,655
131 ½	1,2	1,903	2,803
133 ½	1,3	2,003	2,950
135	1,4	2,103	3,097
137	1,5	2,203	3,244
138 ½	1,6	2,303	3,391
140	1,7	2,403	3,539
141 ½	1,8	2,503	3,686
143	1,9	2,603	3,833
144 ½	2,0	2,703	3,980
145 ½	2,1	2,803	4,127
147	2,2	2,903	4,275
148	2,3	3,003	4,422
149	2,4	3,103	4,569
150	2,5	3,203	4,716
Troisième série d'expériences.			
106	0,150	0,853	1,257
111	0,300	1,003	1,478
119	0,600	1,303	1,920
132	1,200	1,903	2,803
149	2,400	3,103	2,569
Quatrième série d'expériences.			
130	1,1	1,803	2,656
140	1,7	2,403	3,537
150	2,5	3,203	4,717
Cinquième série d'expériences.			
104 ½	0,1	0,803	1,184
107 ½	0,2	0,903	1,331
111	0,3	1,003	1,478
113 ½	0,4	1,103	1,625
116	0,5	1,203	1,772
118 ¾	0,6	1,303	1,920
121	0,7	1,403	2,067

TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de tension de la vapeur au-dessus de la pression atmosphérique.	FORCE de tension de la vapeur en y comprenant celle qui fait équilibre à l'atmosphère ou *force sur le vide*.	PRESSION sur le vide par centimètre carré de surface.
Degrés.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.
123 $\frac{1}{2}$	0,8	1,503	2,214
125 $\frac{1}{4}$	0,9	1,603	2,361
126 $\frac{3}{4}$	1,0	1,703	2,508
129	1,1	1,803	2,656
131 $\frac{1}{2}$	1,2	1,903	2,803
133	1,3	2,003	2,950
134 $\frac{1}{2}$	1,4	2,103	3,097
136 $\frac{1}{2}$	1,5	2,203	3,244
138	1,6	2,303	3,392
139 $\frac{1}{2}$	1,7	2,403	3,539
141	1,8	2,503	3,686
142 $\frac{1}{2}$	1,9	2,603	3,833
144	2,0	2,703	3,979
145	2,1	2,803	4,128
146	2,2	2,903	4,275
147 $\frac{1}{2}$	2,3	3,003	4,422
148 $\frac{1}{2}$	2,4	3,103	4,569
150	2,5	3,203	4,716

Avant de nous croire autorisés à tirer quelques conséquences des expériences précédentes, nous avons jugé convenable d'en faire d'autres sur une plus grande échelle, pour voir si les résultats que nous obtiendrions viendraient coïncider avec les premiers, autant du moins que cela se peut dans des recherches de cette nature, où il y a tant de causes inévitables d'anomalies et d'inexactitudes.

Voici l'appareil dont nous nous sommes servis :

On a fixé verticalement sur la tubulure du couvercle d'une très-forte chaudière en fonte, un corps de pompe bien alaisé, de 53 millimètres de diamètre; ce corps de pompe était renfermé dans une enveloppe cylindrique de cuivre rouge, avec laquelle il était en communication à sa partie inférieure, de telle manière que, quand on introduisait de la vapeur sous

le piston, l'enveloppe en recevait en même temps. Un robinet placé à la partie supérieure de cette enveloppe permettait d'en faire sortir l'air, ainsi que du corps de pompe, et de tenir l'enveloppe à la température de la vapeur de la chaudière.

Un thermomètre centigrade pénétrait dans la chaudière, et un autre dans l'enveloppe.

La tige du piston portait un plateau pour recevoir les poids formés, comme précédemment, de rondelles de plomb; on avait eu la précaution de dresser ces rondelles de telle sorte que le centre de gravité de chacune répondait au centre de la rondelle.

Deux tringles de fer élevées parallèlement aux deux côtés du corps de pompe guidaient le plateau et maintenaient rigoureusement dans la verticale la tige du piston.

Un contre-poids, placé convenablement, mettait en équilibre le poids du piston, de la tige, du plateau, et compensait les frottemens.

Les deuxième et troisième tables suivantes portent les résultats obtenus avec cet appareil; et chaque expérience a été répétée plusieurs fois.

DEUXIÈME TABLE.

1re. *Série d'expériences sur la force de tension de la vapeur, avec un piston de 53 millimètres de diamètre, ou de 2206$^{millim. carrés}$,83 de surface.*

Baromètre 762$^{mil.}$ 5, pression atmosphérique sur la surface du piston, 22$^{kil.}$,78.

TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de tension de la vapeur au-dessus de la pression atmosphérique.	FORCE de tension de la vapeur en y comprenant celle qui fait équilibre à l'atmosphère ou *force sur le vide.*	PRESSION. sur le vide par centimètre carré de surface.
Degrés.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.
106	5	27,87	1,262
111	10	32,87	1,489
115 ½	15	37,87	1,715
120	20	42,87	1,942
124	25	47,87	2,169
127 ½	30	52,87	2,395
130 ¼	35	57,87	2,622
132 ¾	40	62,87	2,849
134 ¼	45	67,87	3,075
137 ½	50	72,87	3,302
139 ½	55	77,87	3,529
141 ½	60	82,87	3,755
143 ¾	65	87,87	3,982
145 ⅓	70	92,87	4,209
147 ⅓	75	97,87	4,435
149 ⅓	80	102,87	4,661
150 ½	85	107,87	4,888
153	90	112,87	5,115
154 ½	95	117,87	5,342
156 ¼	100	122,87	5,569
157 ½	105	127,87	5,795
159	110	132,87	6,022
160 ½	115	137,87	6,248
162	120	142,87	6,475
163 ½	125	147,87	6,702
165	130	152,87	6,928
166	135	157,87	7,154
167 ½	140	162,87	7,381
168	145	167,87	7,608
169	150	172,87	7,834
170	155	177,87	8,062

TROISIÈME TABLE.

2°. Série d'expériences, sur la force de tension de la vapeur, avec le piston de 53 millimètres de diamètre.

Baromètre, 767 millimètres; pression atmosphérique sur la surface du piston = 23 kilogrammes 01.

TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de tension de la vapeur au-dessus de la pression atmosphérique.	FORCE de tension de la vapeur, en y comprenant celle qui fait équilibre à l'atmosphère ou *force sur le vide*.	PRESSION sur le vide, par centimètre carré de surface.
Degrés.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.
110	8,5	31,51	1,428
111	9,5	32,51	1,473
112	10,5	33,51	1,519
113	11,7	34,71	1,573
114	12,9	35,91	1,627
115	13,9	36,91	1,673
116	15,6	38,61	1,750
117	16,8	39,81	1,804
118	18,5	41,51	1,881
119	19,8	42,81	1,940
120	21,2	44,21	2,004
121	22,1	45,11	2,045
122	23,5	46,51	2,108
123	25,2	48,21	2,185
124	26,8	49,81	2,257
125	28,4	51,41	2,330
126	29,7	52,71	2,389
127	31,7	54,71	2,479
128	33,5	56,51	2,561
129	35,5	58,51	2,652
130	37,7	60,71	2,751
131	39,0	62,01	2,810
132	41,8	64,81	2,937
133	44,5	67,51	3,060
134	46,7	69,71	3,159
135	48,7	71,71	3,250
136	51,4	74,41	3,372
137	53,6	76,61	3,472
138	56,2	79,21	3,590
139	58,3	81,31	3,685
140	60,4	83,41	3,781

TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de tension de la vapeur au-dessus de la pression atmosphérique.	FORCE de tension de la vapeur, en y comprenant celle qui fait équilibre à l'atmosphère ou *force sur le vide*.	PRESSION sur le vide, par centimètre carré de surface.
Degrés.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.
141	162,7	85,71	3,885
142	64,8	87,81	3,980
143	67,2	90,21	4,049
144	69,7	92,71	4,202
145	72,2	95,21	4,315
146	74,7	97,71	4,429
147	77,3	100,31	4,546
148	80,2	103,21	4,678
149	82,8	105,81	4,796
150	85,8	108,81	4,932
151	88,9	111,91	5,072
152	92,3	115,81	5,249
153	94,8	117,81	5,340
154	97,8	120,81	5,476
155	101,5	124,51	5,644
156	104,6	127,61	5,784
157	107,9	130,91	5,934
158	111,8	134,81	6,110
159	115,6	138,01	6,255
160	119,5	142,51	6,459
161	123,0	146,01	6,618

Si nous comparons les résultats de nos expériences avec ceux que donne la table de M. Dalton, nous remarquerons qu'ils sont assez d'accord depuis 100 degrés centigrades jusqu'à 130 degrés; mais que, depuis ce dernier terme, ils s'écartent assez rapidement pour présenter une différence de près de *deux atmosphères* de pression à 160 degrés centigrades. Or, comme cette différence que nous avons trouvée en plus, l'a été par des expériences directes, répétées plusieurs fois et variées de diverses manières, il semble permis de conclure, ainsi qu'il en a déjà été question plus haut, que le calcul sur lequel la table de M. Dalton a été fondée, attribue à la force de la vapeur, qui correspond aux degrés élevés de température, une valeur beaucoup moindre qu'elle ne l'est réellement.

Nous n'examinerons pas, du reste, si l'appareil de M. Dalton était mieux purgé d'air que les nôtres; nous nous sommes contentés d'essayer la force de la vapeur dans l'état où elle se trouve, lorsqu'elle sert dans les machines à vapeur. Nous rappellerons toutefois qu'avant de commencer les expériences, on avait soin de purger d'air les capacités, par l'action d'un courant de vapeur qu'on laissait sortir pendant quelques minutes.

Quant aux valeurs trouvées par M. de Betancourt, elles sont plus élevées que les nôtres; il serait superflu d'en chercher les raisons.

Nous avons lieu de croire que ces valeurs sont un peu trop fortes; car il nous est fréquemment arrivé de l'emporter sur la pression réelle de la vapeur, avec le grand piston, en ajoutant un hectogramme à la charge qui faisait équilibre.

Nous pensons, en conséquence, que dans la pratique on peut, sans erreur grave, adopter les nombres que nous avons trouvés.

Il y a bien, dans les diverses séries de nos tables, dans la suite des nombres de chacune, quelques écarts, quelques anomalies qu'il est peut-être impossible d'éviter dans ces sortes de recherches, vû l'imperfection de nos moyens de mesurer des accroissemens égaux de chaleur, surtout à des températures élevées. Il peut se faire que la quantité de chaleur indiquée par la dilatation du mercure dans le thermomètre, depuis 140 degrés, par exemple, de l'échelle graduée, jusqu'à 141 degrés, soit différente de celle qui affecte la vapeur, lorsque le thermomètre passe de 141 à 142 degrés; ainsi les résultats obtenus par l'expérience ne peuvent être considérés comme vrais qu'entre certaines limites de chaleur, correspondantes à chacun de ces résultats, comme, par exemple, entre

un degré au-dessus ou au-dessous de celui qu'on a noté dans l'expérience.

Quoi qu'il en soit, nous remarquerons que les nombres qui expriment la force de tension de la vapeur, dans nos tables, s'approchent bien plus de la régularité d'une progression géométrique, que ceux des tables précédentes, et qu'on n'y voit point sensiblement, comme dans celles-ci, les rapports des termes de la progression aller en décroissant; décroissement qui semble ne s'accorder ni avec nos idées sur la constitution d'une force, ni avec les propriétés les plus incontestables de la vapeur.

La valeur du rapport qui existe entre deux termes consécutifs de nos tables, se soutient *en général* assez bien pour nous avoir permis de dresser une table des forces de tension, depuis 100 degrés centigrades jusqu'à 170 degrés, dont tous les termes s'accordent, autant bien que le sujet le comporte, avec ceux trouvés directement par l'expérience.

Ce rapport est 1,032; et en multipliant par ce rapport la tension correspondante à 100 degrés centigrades, on trouve celle qui correspond à 101 degrés; en multipliant de même celle-ci par ce rapport, on trouve la tension correspondante à 102 degrés, et ainsi de suite. C'est ce que nous avons fait dans la table suivante, en négligeant quelques fractions indifférentes.

TABLE CALCULÉE

Des tensions de la vapeur depuis 100 degrés centigrades jusqu'à 170.

TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de tension par centimètre carré.	TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de tension par centimètre carré.
Degrés.	Kilogrammes.	Degrés.	Kilogrammes.
100	1,035	136	3,205
101	1,068	137	3,308
102	1,102	138	3,414
103	1,137	139	3,523
104	1,173	140	3,636
105	1,208	141	3,752
106	1,247	142	3,872
107	1,287	143	3,996
108	1,328	144	4,124
109	1,370	145	4,256
110	1,414	146	4,392
111	1,459	147	4,533
112	1,506	148	4,678
113	1,554	149	4,827
114	1,604	150	4,981
115	1,655	151	5,140
116	1,708	152	5,304
117	1,763	153	5,473
118	1,819	154	5,648
119	1,877	155	5,828
120	1,937	156	6,014
121	1,999	157	6,206
122	2,063	158	6,404
123	2,129	159	6,608
124	2,197	160	6,819
125	2,267	161	7,037
126	2,340	162	7,262
127	2,415	163	7,494
128	2,492	164	7,733
129	2,572	165	7,980
130	2,654	166	8,235
131	2,739	167	8,498
132	2,827	168	8,769
133	2,917	169	9,049
134	3,010	170	9,338
135	3,106		

En comparant les nombres de cette table avec ceux qu'a donné l'expérience, on remarque que depuis 100 degrés jusqu'à 148 degrés, ils sont constamment un peu plus faibles que ceux-ci; et qu'à partir de ce dernier terme, ils sont constamment un peu plus forts; de telle manière qu'à 170 degrés de température, la table calculée donne une valeur d'environ un 8e. plus élevée que celle de l'expérience. Il ne serait pas hors de raison d'attribuer la différence, d'une part, à la difficulté, on pourrait dire même à l'impossibilité d'évaluer avec exactitude le résultat de semblables expériences; et d'autre part, à l'imperfection de nos échelles thermométriques, qui doit avoir une grande influence sur nos observations, principalement au-delà de 130 degrés centigrades.

Au surplus, l'usage que la pratique pourrait faire de cette table ne serait sujet, selon nous, à aucun inconvénient, attendu, en premier lieu, que s'il était vrai qu'on restât réellement au-dessous de la valeur de la force de tension, dans les limites de 100 degrés à 148, on ne se tromperait qu'à son avantage dans le travail qu'on ferait avec cette force; et en second lieu, que, s'il était vrai qu'on évaluât trop haut pour les degrés supérieurs à 148 degrés, on se mettrait dans le cas de proportionner la résistance des chaudières à cet excès de pression; pression que, sous ce rapport, il vaut toujours mieux s'exagérer que de s'en dissimuler l'étendue.

Maintenant, si l'on continuait de multiplier chaque terme par le rapport 1,032, jusqu'à 216 degrés centigrades, par exemple, et qu'on exprimât la force de tension de la vapeur, par le nombre d'*atmosphères* correspondant aux différens degrés de température, on verrait d'une manière frappante la rapidité de l'accroissement de la force, eu égard à la marche de la température.

Le tableau suivant va nous montrer cet accroissement, et une conséquence importante à en déduire.

Comme l'augmentation d'une atmosphère de pression ne correspond pas exactement à un nombre rond de degrés de température centigrade, nous affecterons du signe + le nombre de degrés qui se trouvera un peu plus fort que ne l'exige le nombre d'atmosphères indiqué, et du signe — le nombre de degrés qui sera trop faible pour le nombre d'atmosphères de pression qu'on lui attribuera dans le tableau.

TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de la vapeur exprimée par le nombre d'atmosphères auquel elle peut faire équilibre, à différens degrés de température, d'après la table calculée.	TEMPÉRATURE centigrade.	FORCE de la vapeur exprimée par le nombre d'atmosphères auquel elle peut faire équilibre, à différens degrés de température, d'après la table calculée.
Degrés.	Atmosphère.	Degrés.	Atmosphère.
100	1	— 195	20
— 122	2	+ 197	21
+ 135	3	— 198	22
— 144	4	+ 200	23
— 151	5	— 201	24
— 157	6	— 202	25
+ 162	7	— 203	26
— 166	8	— 204	27
+ 170	9	— 206	28 à 29
— 173	10	— 207	30
— 176	11	— 208	31
— 179	12	— 209	32
+ 182	13	— 210	33
+ 184	14	— 211	34
— 186	15	— 212	35
— 188	16	— 213	36
— 190	17	— 214	37
+ 192	18	+ 215	38
+ 194	19	+ 216	39

On voit, par ce tableau, que le nombre de degrés de température auquel il faut élever la vapeur pour augmenter

sa force de la valeur d'une atmosphère, va en diminuant à mesure qu'on monte l'échelle de pression; que pour ajouter une atmosphère de pression à de la vapeur à 100 degrés centigrades, il faut l'élever à 122 degrés environ, ou, ce qui revient au même, l'affecter de 22 degrés de température de plus; et que, pour ajouter une atmosphère de pression de plus à la vapeur à 215 degrés, il ne faut pas même un degré de température : à la vérité on double la pression dans le premier cas, et dans le second, on l'augmente seulement d'un trente-huitième; car on remarque, dans les limites du tableau, que pour doubler la pression, quelle qu'elle soit, il faut toujours affecter la vapeur d'un accroissement de température d'environ 22 degrés centigrades. Ainsi donc il faut cet accroissement de température pour passer de 1 à 2 atmosphères, de 4 à 8, de 8 à 16, de 19 à 38, etc.; ce qui montre que si le rapport arithmétique de la progression qui représente la température est 22, le rapport géométrique de la progression exprimant l'accroissement de la force de la vapeur sera 2.

Quant à la conséquence dont il est fait mention plus haut, la voici : puisqu'à une température de 216 degrés centigrades il faut moins d'un degré de chaleur pour augmenter la force de la vapeur d'une quantité équivalente à la pression d'une atmosphère, il semble permis de conclure que vers ces degrés élevés, il y a un point au delà duquel on ne pourrait plus augmenter la tension de la vapeur, avec une chaudière et un fourneau ordinaires, quand bien même toute issue à la vapeur serait fermée, et à plus forte raison si on en laissait échapper des bouffées, comme dans le service d'une machine à vapeur.

On pourrait, selon nous, appuyer cette conséquence du raisonnement suivant : il est de fait, 1°. que, pour convertir une quantité quelconque d'eau en vapeur, ou, si l'on veut, pour

former cette combinaison de calorique et d'eau qu'on nomme vapeur, il faut nécessairement *un certain temps;* ce ne peut être d'une manière subite, instantanée, quelle que soit la *puissance calorifiante* du foyer; 2°. qu'un corps exposé à l'action du feu ne peut augmenter de chaleur que dans le cas où il en reçoit plus qu'il n'en perd par émission, par rayonnement, et l'on sait qu'il en perd d'autant plus qu'il est plus chaud : or, si une chaudière pleine d'eau et de vapeur est arrivée à un tel degré de chaleur, qu'elle en perde, par le rayonnement, autant qu'elle en reçoit du foyer, pendant le temps que la vapeur mettrait à se former dans cette chaudière, il semble évident que le pouvoir absorbant et le pouvoir émissif, venant ainsi à se contre-balancer, la chaleur de l'eau restera stationnaire, ainsi que la tension de la vapeur.

On peut même dire que la chaleur et la tension de l'eau renfermée dans une bombe hermétiquement fermée, et qu'on ferait rougir au feu, sans la fondre, finiraient par devenir aussi stationnaires; mais nous ne nous occupons que de ce qui est relatif à une chaudière à vapeur, telle qu'on l'emploie ordinairement.

Et si, maintenant, l'on connaissait *par quel degré de chaleur* on pourrait exprimer *l'action calorifiante* d'un foyer ordinaire sur une chaudière à vapeur, on saurait qu'à ce degré la tension serait naturellement et nécessairement stationnaire. Il sera question plus loin d'expériences qui nous paraissent venir à l'appui de tout ce que nous disons dans ce moment, et faire présumer qu'on ne peut guère élever à plus de 216 degrés centigrades la température de la vapeur dans une chaudière exposée à l'action d'un foyer ordinaire; peut-être même n'irait-on pas jusque-là, en évacuant la vapeur à mesure qu'elle serait produite.

L'accroissement rapide de la force de la vapeur, par l'action du calorique sur l'eau qui la produit, fait naître une question importante : c'est de savoir si la densité de la vapeur croît comme sa force, c'est-à-dire si, dans un espace donné, la vapeur s'élevant à une tension double, il se trouve une quantité double de molécules d'eau; une quantité quadruple, avec une tension quadruple, etc.

Cette question est présentée comme résolue, dans la table anglaise que nous avons donnée plus haut; cependant il était resté quelques doutes sur l'exactitude de cette solution, quoiqu'on pût se dire que, dans l'hypothèse où, par compression, l'on réduirait à la moitié, au quart, etc., le volume d'une vapeur toute formée, saturant l'espace, et sans qu'elle pût perdre de la chaleur, il paraissait certain, d'après la loi de Mariotte, que la densité croîtrait comme la tension; que, dans un espace sous-double, il y aurait un nombre double de molécules, avec une tension double. Mais en est-il de même lorsque la tension de la vapeur est doublée, triplée, etc., dans un espace donné, par l'action successive du calorique sur une masse d'eau qui fournit à la saturation de cet espace; et comme le calorique peut seul augmenter la tension de la vapeur, sans que la densité de celle-ci soit augmentée, il restait à reconnaître si, dans les accroissemens successifs de la force, l'espace étant supposé saturé, le calorique et l'eau conservaient la même part respective; si l'un des principes constituans ne l'emportait pas sur l'autre, dans les proportions de la combinaison, à divers degrés de température.

Nous avons fait un grand nombre d'expériences, dans la vue d'éclaircir ce point; il serait trop long de les rapporter; plusieurs observateurs s'en étaient occupés aussi avant nous; nous nous bornerons à dire que les résultats obtenus mettent

en droit de conclure, du moins pour la pratique, qu'effectivement la densité est sensiblement proportionnelle à la tension, dans tout espace saturé, et que, lorsque la force de la vapeur est double, son volume contient une quantité d'eau qu'on peut, sans erreur grave, évaluer au double de celle que contiendrait le même volume de vapeur, dont la tension serait moitié moindre.

Rappelons-nous qu'il n'est question ici que de vapeur formée, s'il est permis de le dire, en présence de l'eau, ou, en d'autres termes, qu'il n'est question que d'espace saturé. Nous savons que, lorsque la chaleur agit sur de la vapeur hors de toute communication avec de l'eau *alimentaire*, la tension de la vapeur augmente, sans que la densité change, si le volume de cette vapeur ne peut s'étendre. Il ne serait donc pas exact de dire que toujours la densité de la vapeur est proportionnelle à la tension, ceci n'étant vrai que pour un espace saturé.

Le raisonnement vient, selon nous, fortifier les indications de l'expérience sur ce sujet : si la densité n'était pas proportionnelle à la tension, il s'ensuivrait de deux choses l'une : ou qu'il y aurait plus, ou qu'il y aurait moins d'eau proportionnellement dans un volume donné de vapeur à 100 degrés qu'à 122; à 122 qu'à 144, etc. Mais d'abord il faudrait que, dans les deux cas, il ne fût plus vrai qu'un poids donné de vapeur contient, à toutes les températures, les mêmes proportions de calorique et d'eau; ensuite, si, dans le premier cas, il y avait *plus d'eau* proportionnellement, on serait amené à conclure qu'il faudrait moins de calorique pour faire passer une certaine quantité d'eau à l'état de vapeur élastique, sous une pression forte, que sous une pression plus faible, ce qui répugne aux idées reçues sur la formation de la vapeur.

Dans le second cas, s'il y avait *moins d'eau*, il faudrait ad-

mettre que la vapeur formée au-dessus de la surface de l'eau *alimentaire*, de l'eau d'une chaudière, par exemple, acquerrait un tel surcroît de pression, en se sursaturant de calorique, qu'elle empêcherait graduellement l'eau de se réduire en vapeur; qu'il y aurait dès lors une répartition inégale du calorique entre la masse d'eau et la masse de vapeur exposées au même foyer. Or, il résulterait de là qu'un volume *isolé* de vapeur, saturant l'espace à 100 degrés, échauffée, par exemple, jusqu'à 144 degrés, sans pouvoir se dilater, n'admettrait plus d'eau, si on lui en présentait à ce dernier degré de chaleur, ce qui serait contraire aux faits les plus incontestables concernant la vapeur.

Elle en admettrait, pourrait-on dire, mais peut-être moins proportionnellement qu'entre 100 degrés et 122 degrés. Cette supposition, repoussée déjà par ce que nous venons de dire, l'est encore par les faits et le raisonnement suivans : l'expérience nous a montré qu'à compter de 100 degrés centigrades, il faut un nombre égal de degrés de chaleur sensible pour doubler la force qu'a la vapeur à 100 degrés, à 122, à 144, etc. Si le calorique était admis en plus grande proportion, à diverses températures, dans la composition de la vapeur, il y existerait à l'état latent, et il s'ensuivrait que, plus la vapeur viendrait se comprimer sur elle-même, par l'action du feu sur l'eau qui la produit, plus elle admettrait proportionnellement de calorique latent. Or, cette conclusion serait en opposition directe avec les phénomènes que la vapeur nous présente, soit qu'on la comprime, soit qu'elle se raréfie.

Puis donc que les expériences directes tentées sur cette matière, expériences extrêmement difficiles à faire avec exactitude, s'accordent avec ces raisonnemens, il est permis, ce semble, de ne plus élever de doute sur la proportionnalité de la densité de la vapeur avec sa tension ; ce qui revient à dire, comme

dans les chapitres précédens, que toute vapeur qui sature l'espace, quelle qu'en soit la température, contient, sous le même poids, les mêmes quantités d'eau et de calorique; proposition importante dont nous aurons lieu plus loin de faire l'application au service industriel des machines à vapeur (1).

Enfin, il résulte de ce qui précède, et particulièrement de nos expériences, que la pratique peut faire usage de la réduction que nous avons donnée précédemment de la table anglaise sur les poids de la vapeur par décimètres et mètres cubes, à divers degrés de température; qu'ainsi, sous la pression atmosphérique, à 100 degrés centigrades, un mètre cube de vapeur pèse . . . . 578 grammes

à 122 degrés	1 kil ,156
à 144	2 ,312
à 166	4 ,624
à 188	9 ,248
à 210	18 ,496

ou à peu près la 54e. partie du poids de l'eau à l'état liquide; on aura 10 grammes de plus par mètre cube, si l'on adopte la densité de la vapeur, comme nos chimistes.

Nous allons, pour terminer ce chapitre, rapporter, dans un tableau, les résultats obtenus par divers expérimentateurs, sur la tension de la vapeur. Ce tableau est dressé d'après celui que M. Taylor a fait insérer dans le 69e. vol., pag. 453 du Journal *the philosophical Magasine.* Nous avons cru devoir ajouter aux résultats des auteurs anglais les résultats trouvés par M. Bettancourt, et ceux auxquels nous sommes parvenus nous-mêmes.

---

(1) Nous croyons que MM. Clément et Desormes sont les premiers qui aient fait connaître en France cette proposition et qui l'aient démontrée par l'expérience.

M. Taylor pense que MM. Robison et Watt n'ont point consulté l'expérience au delà du terme où il s'est arrêté dans son tableau. Il craint que les résultats de M. Dalton ne soient incertains, parce qu'ils ont été déduits par le calcul seulement, d'après des expériences faites au-dessous du terme de l'ébullition.

Il regrette que M. Southern n'ait point fait connaître des expériences qu'il a répétées devant la Société royale de Londres. Il ne dit rien des travaux de M. Ure.

M. Taylor, dans son tableau, ne donne que l'excès de la force de la vapeur sur la pression ordinaire de l'atmosphère, pression qu'il suppose, avec ses compatriotes, équivalente au poids d'une colonne de mercure de 30 pouces anglais = 762 millimètres, ce qui revient à 1 kil., 036 par centimètre carré.

Les résultats de M. Bettancourt offrent une anomalie : en effet, la force y croît moins de 130 à 135 degrés, que de 125 à 130.

Nous avons ajouté à côté des nombres que nous ont fournis nos expériences, ceux qui proviennent de la table calculée dont il a été question précédemment.

TABLEAU COMPARATIF

De la force de tension de la vapeur, à différens degrés de température au-dessus du terme de l'ébullition, suivant divers auteurs. C'est la tension exercée contre une surface d'un centimètre carré, *tension évaluée en kilogrammes.*

TEMPÉRATURE centigrade.	BÉTANCOURT.	ROBISON.	WATT.	SOUTHERN.	DALTON.	URE.	TAYLOR.	CHRISTIAN. d'après l'expérience.	CHRISTIAN. d'après la table calculée.
Degrés.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.
100	1,031	1,036	1,036		1,036	1,036	1,036		1,035
105	1,274	1,258	1,189		1,224	1,188	1,223	1,212	1,208
110	1,554	1,536	1,399		1,441	1,489	1,433	1,506	1,414
115	1,859	1,772	1,653		1,681	1,749	1,677	1,750	1,655
120	2,216	2,211	1,931	1,997	1,943	2,056	1,959	2,004	1,937
125	2,632	2,619	2,176		2,229	2,378	2,162	2,389	2,267
130	3,081	3,044	2,548		2,538	2,770	2,664	2,751	2,654
135	3,428	3,446			2,865	3,233	3,096	3,250	3,106
140					3,128	3,754	3,586	3,781	3,636
145				4,119			4,134	4,315	4,256
150					3,934	4,966	4,753	4,932	4,981
155								4,644	5,828
160					4,663		6,196	6,459	6,819
165								6,928	7,980
170								8,062	9,338

CHAPITRE XXXX.

Sur la force expansive de la vapeur.

La tension de la vapeur dont nous avons parlé jusqu'à présent est celle qui fait équilibre à une résistance supposée de même valeur : c'est comme un ressort bandé sous une pression suffisante pour le tenir dans cet état.

Dans cet état, la vapeur jouit d'une force de pression constante pour chaque degré de température, lorsque l'espace est maintenu dans une saturation complète; et, sous cette dernière condition, la force est au *maximum* d'intensité, eu égard au degré de température qui affecte la vapeur.

Pour lui conserver ce *maximum*, il faut non-seulement soutenir sa température, mais encore la densité correspondante à cette température. Si l'une et l'autre diminuent dans un espace donné, la force s'affaiblit, et si la température augmente, sans que la densité en suive les progrès, la force de la vapeur n'est plus un *maximum*.

La condition du *maximum* de force, correspondante à chaque degré de chaleur, est donc rigoureusement dans la saturation absolue de l'espace, maintenu à ce degré; c'est dans cet état que cette force est composée de la somme entière des élémens constitutifs qu'elle peut admettre à chaque changement de température.

Or, la force de la vapeur relative à chaque degré, et à un degré quelconque de température, décroît, dans les circonstances

suivantes, et prend dans son développement le nom de *force expansive* ou de *détente*.

1°. Si dans un espace saturé de vapeur, à un degré quelconque de température, il y a abaissement de température, la portion de vapeur qui ne se condensera pas se détendra, occupera encore l'espace en vertu de sa force expansive; mais elle aura perdu de sa force; et, bien que l'espace soit encore saturé, il ne l'est plus de la même espèce de vapeur; il ne l'est que par rapport au nouveau degré de chaleur auquel la vapeur est descendue.

2°. Si l'on élevait la température d'un espace primitivement saturé de vapeur, il ne serait plus saturé au nouveau degré de chaleur qu'on lui aurait donné, et la force de cette vapeur, ainsi échauffée, serait au-dessous de celle qui, correspondant à ce nouveau degré de chaleur, saturerait l'espace. En effet, la somme des élémens constitutifs de la force (chaleur et eau) n'est pas complétée; il y manque la quantité d'eau qu'exige le point de température où l'on a porté la vapeur. Or si, dans cet état, la force venait à se déployer, ce ne pourrait être que par expansion.

3°. Si la résistance qui fait équilibre à la tension de la vapeur au *maximum*, vient à céder, ou ce qui est la même chose, si l'espace s'agrandit, la force de la vapeur restera la même, dans le cas où le fluide pourra affluer en assez grande quantité de la source qui le produit, pour que la température primitive ne change point, et que l'espace agrandi reste saturé de vapeur de même densité; c'est sous ce point de vue que la pression de la vapeur est une force accélératrice analogue, pour le mouvement qu'elle communique, à la pesanteur. Mais si, la résistance venant à céder, l'espace s'agrandit devant une *portion limitée* de vapeur, séparée, ne fût-ce qu'un instant, de l'eau qui

la produit, cette vapeur se détend, sa température et sa densité diminuent, ainsi que sa force, à mesure que l'espace s'agrandit; l'expansion de la vapeur est donc une force décroissante qui ne peut imprimer à une résistance constante qu'une vitesse décroissante.

Il s'agirait maintenant de savoir quels sont les degrés de force, correspondant à divers degrés d'expansion, dans les deux cas suivans qui se présentent. 1°. lorsque la vapeur est abandonnée à l'abaissement naturel de température qui naît de la détente; on se rappellera que la vapeur, en se raréfiant par l'expansion, rend latente une certaine portion de son calorique libre; 2°. lorsqu'on fait agir la chaleur sur la vapeur qui se détend, de manière à conserver la température qu'elle avait avant l'expansion.

Pour ce qui regarde le premier cas, on est assez généralement d'accord que la loi de Mariotte, pour la détente de l'air comprimé, s'applique à la vapeur, c'est-à-dire que la force d'une portion donnée de vapeur, saturant l'espace, décroît comme son volume augmente par l'expansion; qu'ainsi une vapeur qui occupe, en se détendant, un espace double, ne jouit plus que de la moitié de sa force de tension; que du tiers ou du quart, si elle occupe un espace double ou quadruple.

A défaut d'expériences directes et concluantes sur cette matière, voyons si l'application de la loi de Mariotte peut s'accorder avec la théorie de la force de la vapeur qu'il semble permis de se former d'après ce qui précède.

Supposons qu'on introduise, sous le piston d'un corps de pompe, une certaine quantité de vapeur à un degré de température quelconque, que cette vapeur sature l'espace qui lui est laissé dans ce corps de pompe; nous savons qu'une force de pression d'une certaine valeur s'exerce sur chaque point, sur chaque centimètre carré par exemple, de la surface inférieure

de ce piston; mais d'où vient cette force? Nous savons encore qu'elle naît d'une combinaison de calorique et d'eau dans certaines proportions, et qu'une diminution ou une augmentation dans les quantités respectives de ces deux principes constituans, affaiblirait ou augmenterait la force. Or, à chaque centimètre carré de surface, dans notre supposition, répond immédiatement un certain nombre de molécules de cette combinaison de calorique et d'eau, et c'est de la valeur de ce nombre que dépend celle de la pression exercée sur un centimètre carré.

Que si l'on venait à diminuer de la moitié, du quart, le nombre des molécules de vapeur qui correspondent à chaque centimètre carré, il semble évident que la pression, sur cette surface, ne serait plus que la moitié, ou le quart de la pression primitive : qu'arrive-t-il donc, lorsque, soulevant le piston, la vapeur peut occuper, par exemple, un espace double? chaque point de l'espace qui contenait, supposons, huit molécules de vapeur, avant son expansion, n'en contient plus que quatre, et chaque centimètre carré de la surface du piston ne reçoit par conséquent plus d'action que d'un nombre de molécules moitié moindre; et si, comme il paraît probable, cette action sur une surface dépend du nombre des molécules qui touchent immédiatement chacun des points de cette surface, on est amené à conclure qu'en diminuant ce nombre de la moitié, du quart, ou de toute autre quantité, on affaiblit l'action de la force de la vapeur, sur cette surface, dans la même proportion. Il semblerait donc, d'après ce raisonnement, que la loi de Mariotte peut s'expliquer de cette manière et s'applique à la vapeur sans choquer les idées qu'il est assez naturel de se faire de cette force, et qu'en conséquence une vapeur qui se développe dans un espace douple, triple, etc., par expansion, n'a plus que la moitié ou le tiers de sa tension primitive.

Enfin, si, pour appuyer cette conclusion, on voulait insister, on dirait qu'il est impossible de concevoir qu'une portion donnée de vapeur, saturant un espace, puisse en occuper un double et conserver *plus*, ou conserver *moins* que la moitié de sa tension. En effet, par cette expansion, on n'introduit dans la force aucun élément nouveau, et l'on doit supposer qu'on n'en ôte aucun; cependant on double le nombre de points de l'enveloppe cylindrique qui circonscrit l'espace; or, si la vapeur conservait *plus de la moitié* de sa tension, la somme des tensions sur chaque point serait plus grande que la tension primitive avant l'expansion; la force de la vapeur se serait donc augmentée, sans que les élémens qui la constituent essentiellement eussent subi aucun changement, ce qui n'est pas soutenable; et, s'il restait à la vapeur *moins de la moitié* de sa tension primitive, la somme des tensions sur chaque point de l'enveloppe doublée serait moindre que la tension primitive; la vapeur aurait donc perdu une portion des élémens de sa combinaison, et ici nous devons supposer qu'elle n'en perd point par le fait de son expansion. Puis donc que, dans cette supposition, la tension ne peut pas être plus que la moitié de ce qu'elle était, et qu'elle ne peut pas être moins non plus, il faut conclure qu'elle est exactement la moitié.

Cherchons maintenant quelle est la force de la vapeur à divers degrés d'expansion, dans le second cas dont nous avons fait plus haut la distinction; savoir, lorsqu'on fait agir la chaleur sur la vapeur qui se détend, de manière à conserver la température qu'elle avait avant l'expansion.

Nous allons d'abord parler de l'opinion de M. Woolf à ce sujet, en rapportant ce qu'en a dit la *Bibliothéque britannique*, tom. 28, pag. 271 et suiv.

« M. Watt, qui s'est occupé avec tant de succès du perfec-

tionnement des machines à vapeur, avait découvert que la vapeur de l'eau, tendant à soulever la soupape de sûreté d'une chaudière, avec une tension représentée par *quatre livres* pesant, sur un *pouce* carré de surface; que cette vapeur, disons-nous, était capable de se déployer dans un espace *quatre fois* plus considérable que celui qu'elle occupe étant comprimée, en conservant, après cette expansion, une force élastique égale à la pression de l'atmosphère.

» M. Woolf, en poursuivant cette recherche, a trouvé la plus simple des formules imaginables pour exprimer le rapport qui existe entre le volume de la vapeur (supposée toujours capable de soutenir la pression de l'atmosphère) et son effort contre une surface d'un *pouce* carré de la chaudière, exprimée en *livres*; c'est-à-dire que, lorsque la vapeur exerce sur cette surface un effort égal à *cinq livres*, elle tend à occuper un volume cinq fois plus grand, sous la pression atmosphérique simple; que, si l'effort est de *six*, *sept*, *huit*, *neuf* ou *dix livres*, la vapeur tend respectivement à occuper un espace *six*, *sept*, *huit*, *neuf* ou *dix* fois plus grand, en demeurant toujours capable de soulever une atmosphère......

» Ce rapport se soutient bien plus loin encore, tellement qu'une vapeur qui exerce sur un *pouce* carré de surface d'une soupape de sûreté une force de vingt, trente, quarante ou cinquante *livres*; tendra à occuper un espace vingt, trente, quarante ou cinquante fois plus grand, en demeurant toujours capable, après cette expansion, de soulever une atmosphère; enfin l'auteur affirme qu'on peut établir que, soit dans les degrés d'expansibilité intermédiaires à ceux-là, soit au delà de ce terme, le nombre de fois qu'une vapeur d'une température et d'une force élastique données peut multiplier son volume primitif mesuré à la température de l'eau bouillante, est à très-

peu près exprimé par le nombre de *livres* que cette vapeur peut soutenir sur un *pouce* carré de surface exposée à la pression atmosphérique; bien entendu que l'espace ou le vase dans lequel on laisse arriver la vapeur est élevé à la même température qu'avait cette vapeur avant qu'on laissât agir librement sa force expansive.

» Quant aux températures requises pour produire et entretenir dans la vapeur diverses forces expansives supérieures au poids de l'atmosphère, M. Woolf a trouvé, par l'expérience, qu'en partant du terme de l'eau bouillante = 212 degrés de Fahrenheit (degré auquel la vapeur peut précisément soutenir le poids de l'atmosphère), pour lui donner une augmentation de force égale à cinq *livres* par *pouce* carré, il faut élever la température jusqu'à environ 227 degrés $\frac{1}{2}$ de Fahrenheit; alors la vapeur aura acquis la faculté de se dilater jusqu'à cinq fois son volume, et sera toujours égale en force au poids de l'atmosphère; et quant aux autres pressions, températures et forces expansives correspondantes de la vapeur, on les trouve indiquées dans le tableau suivant, borné aux limites au delà desquelles la force expansive deviendrait intraitable et dangereuse dans son action. »

PRESSION en livres (anglaises) par *pouce carré* (anglais) dont la vapeur surpasse la pression atmosphérique.	DEGRÈS RESPECTIFS du thermomètre de Fahrenheit auxquels il faut soutenir la vapeur qui se détend.	GRANDEUR DES VOLUMES qu'elle peut prendre à peu près par expansion, à ces divers degrés de température, en conservant une pression égale à l'atmosphère.
Livres:	Degrés de Fahrenheit.	
5	227 $\frac{1}{2}$	5
6	230 $\frac{1}{4}$	6
7	232 $\frac{3}{4}$	7
8	235 $\frac{1}{4}$	8
9	237 $\frac{1}{2}$	9
10	239 $\frac{1}{2}$	10
15	250 $\frac{1}{2}$	15
20	259 $\frac{1}{2}$	20
25	267	25
30	273	30
35	278	35
40	282	40

La valeur de l'influence de la *chaleur seule* sur la force d'une vapeur qui prend de l'expansion, a été, d'après les auteurs de la *Bibliothéque britannique*, aperçue premièrement par Watt et vérifiée ensuite par M. Woolf.

La manière dont on a procédé pour obtenir les résultats rapportés dans le tableau ci-dessus, n'a été, que nous sachions, décrite nulle part; on doit d'autant plus le regretter qu'ils sont plus inattendus, plus inexplicables.

En effet, il faudrait conclure de ce qui précède que de la vapeur formée à 122 degrés centigrades, température à laquelle nous savons que sa force est à peu près égale à deux atmosphères, peut prendre un volume environ *quinze fois* plus grand et conserver une pression égale à une atmosphère, si l'on maintient la température de la vapeur, ainsi développée, à 122 degrés centigrades.

D'après la loi de Mariotte, une expansion de cette grandeur, sans le concours de l'action du calorique sur la vapeur,

réduirait la pression à 2 *livres* par *pouce* carré, tandis qu'avec ce concours, et d'après M. Woolf, la pression resterait égale à 15 *livres* par *pouce* carré environ. Il faudrait donc attribuer à l'influence de la chaleur seule une addition de force équivalente à 13 *livres* par *pouce* carré.

Pour discuter ce point avec quelque espoir de le ramener à la théorie de la vapeur, il serait nécessaire de savoir, 1°. quelle quantité de chaleur a été absorbée par la vapeur, pendant son expansion, pour rester à son degré primitif de température; 2°. quel surcroît de pression l'on doit attribuer à chaque degré de chaleur. On sait, d'après les expériences de M. Gay-Lussac, que, pour chaque degré depuis 0 centigrade jusqu'à 100 degrés, les gaz permanens, et très-probablement la vapeur d'eau, augmentent de pression de 0°,00375; mais, d'une part, ce surcroît de pression est-il le même pour chaque degré au-dessus de 100 degrés? l'expérience n'a pas prononcé; et, d'autre part, à quel nombre de degrés répond la chaleur absorbée? c'est ce qu'on ne connaît point.

Toutefois, si l'on voulait supposer que l'augmentation de pression, pour chaque degré, suit la même loi au-dessus de 100 degrés qu'au-dessous, et admettre l'hypothèse que les quantités de chaleur nécessaires pour élever à la même température des *espaces* de grandeurs différentes, sont proportionnelles à ces grandeurs, on se rapprocherait des résultats annoncés par M. Woolf, et l'on dirait, en rappelant l'exemple précédent: une unité d'espace saturé de vapeur présente, *dans tous ses points*, une température égale à 122 degrés; si vous rendez cet espace quinze fois plus grand, peut-être faut-il, pour lui donner une température de 122 degrés dans tous les points de ce nouvel espace, l'affecter de quinze fois autant de chaleur, c'est-à-dire de 1830 degrés. Or, en calculant d'après la

loi de Mariotte et celle de M. Gay-Lussac, on trouverait qu'il resterait à la vapeur une pression d'environ 13 *livres*, 72 par *pouce* carré.

Mais tout ceci encore n'est que de pure spéculation; et si la loi que M. Woolf a cru reconnaître n'a d'autre appui que des hypothèses, il sera permis de la regarder comme très-problématique.

Dans cet état d'incertitude, nous avons voulu interroger nous-mêmes l'expérience, en nous y prenant de la manière suivante :

Nous nous sommes servis du même appareil que celui dont nous avons parlé plus haut au sujet de la tension de la vapeur sur un piston de 53 millimètres de diamètre; on se rappellera que le corps de pompe était recouvert dans toute sa longueur d'une enveloppe cylindrique de cuivre rouge. Le seul changement que nous y avons fait a été de supprimer toute communication entre le corps de pompe et l'espace annulaire formé par l'enveloppe, et de mettre cet espace en communication directe avec la chaudière par un bout de tuyau.

Avant de commencer les expériences, on a eu soin d'échauffer également le corps de pompe et l'enveloppe, et de les porter à la même température que la vapeur renfermée dans la chaudière.

Arrivé à ce point, on mesurait la tension de la vapeur, après avoir soulevé et maintenu le piston à *une unité de hauteur;* on fermait promptement le robinet de communication entre la chaudière et le corps de pompe, on portait le piston à une hauteur *double* ou *triple*, et on mesurait les tensions à ces deux degrés d'expansion. On examinait attentivement le thermomètre de l'enveloppe, qui restait à la même température que la chaudière. Chaque expérience a été répétée plusieurs fois. Nous en consignons les résulats dans le tableau suivant.

TABLEAU D'EXPÉRIENCES

Pour déterminer la tension d'une vapeur donnée, et maintenue à sa température primitive, lorsqu'on l'a portée à différens degrés de détente ou d'expansion, sur un piston de 53 millimètres de diamètre, ou de 2206 millimètres carrés de base. Le baromètre était à 767 millimètres; pression atmosphérique sur la base du piston 23[kilogr.]*,009.*

TEMPÉRATURE centigrade.	PRESSION de la vapeur avant l'expansion.		PRESSION de la vapeur occupant un espace double, par expansion.		PRESSION de la vapeur occupant un espace triple, par expansion.		PRESSION de la vapeur sur l'atmosphère avant l'expansion, par 733 millimètres carrés, ou par un *pouce* carré.	PRESSION de cette vapeur occupant un *espace double*, sur l'atmosphère, par 733 millimètres carrés, ou par *pouce* carré.	PRESSION de cette vapeur occupant un espace triple, sur l'atmosphère, par 733 millimètres carrés, ou par *pouce* carré.
	Sur l'atmosphère.	Sur le vide.	Sur l'atmosphère.	Sur le vide.	Sur l'atmosphère.	Sur le vide.			
Degrés.	Kilogrammes.	Kilogram.	Kilogrammes.	Kilogram.	Kilogrammes.	Kilogram.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.
110	8,5	31,509	4,0	27,009	1,0	24,009	2,823	1,328	0,332
115	13,9	36,909	9,5	32,509	5,5	28,509	4,617	3,155	1,826
120	21,2	44,209	14,5	37,509	10,5	33,509	7,042	4,817	3,488
130	37,5	60,509	24,0	47,009	16,5	39,509	12,456	7,972	5,481
140	58,0	81,009	30,5	53,509	19,5	42,509	19,265	10,130	6,476
150	82,5	105,509	48,5	71,509	35,0	58,009	27,403	16,109	11,625

Les nombres portés dans les 8e, 9e et 10e colonnes expriment la valeur de la tension de la vapeur par *pouce* carré de surface, *au-dessus d'une atmosphère*, savoir : la 8e colonne, pour la vapeur, au *maximum* de force, ou, en d'autres termes, pour la vapeur saturant l'espace; la 9e colonne, pour la même vapeur au double d'expansion; et la 10e, pour cette vapeur au triple d'expansion, c'est-à-dire ayant pris un volume triple.

On remarque qu'à l'exception du premier nombre de la 9e. colonne qui semble présenter une anomalie, l'expansion double laisse à la vapeur un peu plus de la moitié de l'excédant au delà d'une atmosphère qu'elle avait avant l'expansion, et que l'expansion triple lui laisse un peu plus du tiers de cet excédant; or, s'il était permis de conclure de ce qui se passe dans ces deux premiers degrés d'expansion, pour ce qui peut avoir lieu à d'autres degrés d'expansion, on dirait que l'expansion à quatre, à cinq, à six fois, etc., laisse encore à la vapeur le quart, le cinquième, le sixième environ de l'excédant qu'elle avait au-dessus d'une atmosphère. Une conclusion de cette espèce, si on pouvait l'admettre, paraîtrait venir à l'appui de la règle proposée par M. Woolf; mais d'abord nous n'avons pas été à même de pousser l'expansion assez loin pour l'admettre; ensuite nous dirons plus : nous aurions poussé l'expansion jusqu'à quinze fois, vingt fois le volume primitif de la vapeur, nous aurions trouvé qu'à quinze ou vingt fois, la vapeur conservait encore la quinzième ou la vingtième partie à peu près de son excédant de tension sur l'atmosphère, que nous ne nous croirions pas encore en droit de conclure qu'un volume de vapeur donné, d'une tension égale, par exemple à deux atmosphères ou à 30 *livres* par *pouce* carré, et renfermé dans un vase *qui ne contiendrait absolument aucune particule d'eau à l'état liquide*, dût conserver, en occupant

par expansion un espace quinze fois plus grand, une pression à peu près égale à une atmosphère, dans le cas où la température primitive serait conservée, ainsi que M. Woolf le prétend.

Ce qui nous ferait grandement douter de l'exactitude des résultats fournis par nos propres expériences, c'est que nous ne pourrions pas affirmer que quelques gouttes d'eau liquide ne se trouvaient point dans l'espace dans lequel l'expansion s'est faite ou se serait faite; or cette eau, en se réduisant en vapeur par l'effet de l'expansion et de la chaleur affluente, vient ajouter à la tension; et la valeur trouvée ou qu'on trouverait dans ce cas n'appartiendrait réellement pas au volume de vapeur sur lequel on a cru uniquement opérer.

Ceux qui ont manié des appareils à produire de la vapeur savent que quand on lance de la vapeur par bouffées dans un corps de pompe, il est rare que des gouttes de liquide ne l'accompagnent et ne viennent se loger dans l'espace où l'on fait agir la vapeur. Cette circonstance est une cause d'erreur difficile à écarter dans les expériences de la nature de celles dont il est question et surtout avec un appareil comme celui dont nous nous sommes servis.

Nous dirons au reste, pour terminer sur cette matière, qu'il paraît certain qu'on conserve à la vapeur un degré de tension relative assez considérable, en maintenant sa température primitive, pendant qu'elle subit divers degrés d'expansion.

Mais quelle est la valeur réelle de cette tension conservée, en toutes circonstances, et indépendamment du concours de l'eau à l'état liquide? nous pensons que c'est à de nouvelles expériences qu'il appartient de la déterminer; expériences fort délicates, fort difficiles à faire, si l'on veut se mettre à même de compter avec certitude qu'on n'opère que sur de la vapeur pure, dans un espace parfaitement dépouillé d'eau à l'état liquide.

CHAPITRE XXXXI.

Sixième question : *Quelle quantité de vapeur, à tel degré de tension, peut-on produire avec une certaine quantité de divers combustibles.*

Après ce que nous venons de voir des propriétés de la vapeur, il est temps de nous rapprocher de ses applications industrielles, et la première question qui semble devoir s'offrir à notre examen est de savoir combien il faut dépenser de combustible pour produire telle quantité de vapeur, douée de tel degré de force, ou, en d'autres termes, à combien revient la production d'un nombre déterminé de mètres cubes de vapeur à un degré de tension donné.

La question, posée ainsi, ne paraît pas soluble d'une manière générale : le prix de la vapeur, sans avoir égard même à la variation des prix des combustibles, suivant les localités, dépend de deux causes principales d'une grande influence : 1°. de la manière de faire brûler le combustible et d'introduire la chaleur, provenant de la combustion, dans l'eau du vase à vapeur; 2°. du temps qu'on emploie, par exemple pour produire un mètre cube de vapeur à une pression déterminée.

Or il peut se faire, en premier lieu, que, par l'imperfection du foyer comburant et de la manière d'en appliquer la chaleur à la formation de la vapeur, on dépense peut-être le double ou le triple de combustible, qu'avec d'autres méthodes, d'autres appareils moins imparfaits.

Il est certain, en second lieu, que plus on met de temps à

produire de la vapeur destinée à servir de force motrice, plus on dépense proportionnellement de combustible; c'est-à-dire qu'il coûte moins, à proportion, pour former un mètre cube de vapeur à une atmosphère de pression par seconde, que par minute : les pertes inévitables de chaleur ne sont pas en raison des dimensions des appareils; les petits perdent proportionnellement plus que les grands. On se rendra assez aisément raison de ce fait, bien reconnu dans la pratique, si l'on veut bien se rappeler ce que nous avons dit, en examinant les propriétés de la chaleur.

On ne peut donc assigner à la production d'un mètre cube de vapeur, par exemple, une valeur d'une application générale; il faudrait nécessairement avoir égard aux circonstances particulières de cette production. Mais comment les déterminer ces circonstances, qui peuvent varier à l'infini? comment définir et évaluer des degrés d'imperfection, des causes de pertes de chaleur, tout aussi variables? ce ne peut donc être, en dernier résultat, qu'après avoir soumis à l'expérience chaque appareil à vapeur, qu'on peut reconnaître à combien revient la production d'un volume de vapeur, à une tension et en un temps donnés.

Dans l'état dans lequel la question qui nous occupe semble devoir être laissée, nous sommes forcés de nous borner à rapporter les résultats obtenus par divers observateurs qui ont cherché à déterminer le *maximum* de chaleur que pouvaient produire certaines quantités de combustibles différens, ou le *maximum* d'eau qu'elles pouvaient élever à l'ébullition, ou faire passer à l'état de vapeur. Mais, pour obtenir ces résultats, on a usé de précautions, on a donné des soins aux appareils, qu'il n'est guère possible d'apporter aussi rigoureusement dans les travaux en grand : de sorte que les données fournies par les

expériences, et que nous allons consigner ici, serviront à montrer, non pas ce qu'en général la vapeur peut coûter, ce qu'on peut en obtenir avec une certaine quantité de combustible donnée; mais bien ce qu'on pourrait produire si les appareils étaient aussi parfaits que possible, et les pertes de chaleur un *minimum*. On sera du moins à même, avec ces données, d'évaluer jusqu'où se porte le degré d'imperfection des moyens le plus habituellement en usage.

Voici d'abord un tableau dans lequel on a consigné les quantités de glace fondue par la chaleur provenant de la combustion de plusieurs substances; d'après MM. Lavoisier et Laplace.

Une livre de gaz hydrogène brûlé, fond	312 livres de glace.
d'huile d'olive.	148,883
de cire blanche.	140,000
de phosphore	100,000
de charbon	96,351
de suif	95,813
d'éther sulfurique.	74,313
de salpètre avec o,^{liv} 3125 de charbon.	12,000

Si l'on se rappelle qu'il faut une livre d'eau à 75° centigrades de chaleur, pour fondre une livre de glace, on pourra aisément apprécier le nombre de degrés de chaleur développée dans la combustion d'une livre de chacune de ces substances : au surplus, le tableau suivant, qu'on trouve dans le traité de physique de M. Biot, va nous montrer l'élévation de température que la combustion de *un gramme* de divers corps communique à *un gramme* d'eau à 0°, d'après les expériences de MM. Lavoisier et Laplace, et celles de Rumford.

Hydrogène	23400	Lavoisier et Laplace.
Huile d'olive	11166	*Les mêmes.*
	9044	Rumford.
Cire blanche	10500	Lavoisier et Laplace.
	9479	Rumford.
Huile d'alcohol épurée	9307	Rumford.
Suif	8369	Rumford.
	7186	Lavoisier et Laplace.
Éther sulfurique, pesanteur spécifique 0,72837 à 20°	8030	Rumford.
Phosphore	7500	Lavoisier et Laplace.
Charbon	7226	*Les mêmes.*
Naphte, pesanteur spécifique, 0,82831 à 13°	7338	Rumford.
Alcohol à 42° aréomètre, pesanteur spécifique, 0,817624 à 15°,5	6195	*id.*
Idem plus aqueux, pesanteur spécifique, 0,84714 à 15°,5	5422	*id.*
Idem à 33° aréomètre ; pesanteur spécifique, 0,85324 à 15°,5	5261	*id.*
Bois de Chêne	3146	*id.*

Si vous divisez par 100° le nombre de degrés de chaleur marqués dans le tableau pour chaque substance, vous aurez le nombre de grammes d'eau à 0 degré qu'un gramme de l'une quelconque de ces substances peut porter à l'ébullition, par la chaleur qu'elle développe en brûlant. Ainsi un gramme de bois de chêne, par exemple, fera passer de 0 degrés au terme de l'ébullition 31$^{\text{gram.}}$,46 d'eau, et comme il faut à peu près six fois autant de chaleur pour réduire en vapeur une certaine quantité d'eau que pour la porter de 0 degrés à 100 degrés centigrades, on voit qu'un gramme de bois de chêne réduirait en vapeur à peu près 5 grammes d'eau à 0 degrés.

Nous ajouterons aux tableaux précédens les deux suivans, le premier est extrait de l'ouvrage de M. Buchanan sur l'emploi de la chaleur, et le second est dû aux recherches de MM. Clément et Désormes.

Une livre pesant de	Suffit pour faire passer de 0 à 100 degrés centigrades	Suffit pour réduire en vapeur	NOMS des observateurs.
	Livres d'eau.	Livres.	
Charbon de bois ou de pierre au *maximum*.	50 à 52	6 ou 7	Dalton.
Charbon de pierre.	36 $\frac{1}{10}$	7	Rumford.
Charbon de bois.	57,608	10,9	Crawford.
Chêne sec.	31,7		Lavoisier.
Bois de sapin.	20,1		Rumford.
Charbon de terre de Newcastle.		6	Watt.
Idem.		7,89	Black.
Idem.		6,25	Watt.

Tableau représentant le nombre d'*unités* de chaleur communiquées à un kilogramme d'eau à 0 degré, par la combustion d'un kilogramme de divers corps, d'après MM. Clément et Désormes.

charbon de terre, environ. . . . 7000 unités
charbon de bois. 7050
bois. 3000
tourbe. 3000

En divisant ces derniers nombres par 100, on aura le nombre de kilogrammes d'eau à 0 degré élevés à l'ébullition par la combustion d'un kilogramme de l'une de ces substances; et en divisant le quotient obtenu par 6, suivant les uns, ou par 6,50 suivant les autres, on trouvera le nombre de kilogrammes de vapeur qu'on peut produire avec un kilogramme de chacun de ces combustibles.

Un kilogramme de bon charbon de terre devrait donc produire environ 10 kilogrammes de vapeur, si l'appareil employé n'occasionait point de perte de chaleur; et comme à 100 degrés de température, un kilogramme de vapeur saturant l'espace

avec une atmosphère de pression, occupe un espace d'environ 1700 décimètres cubes, il s'ensuivrait qu'en brûlant un kilogramme de charbon de terre, on développerait assez de chaleur pour produire environ 17000 décimètres cubes de vapeur à une atmosphère de pression, ou 8500 décimètres cubes à deux atmosphères, etc.

Nous croyons utile, d'après ce qui précède et ce que nous avons dit sur la vapeur, de donner un tableau représentant d'une *manière approximative* les divers volumes de vapeur à différens degrés de tension qu'on produirait par la combustion d'un kilogramme des combustibles les plus en usage, en supposant qu'on employât un appareil qui n'occasionât pas ou qui occasionât peu de perte de chaleur.

NOMS des substances.	Volume approximatif de vapeur produite par la combustion d'un kilogramme de chacune des substances.			
	à une atmosphère de pression.	à deux atmosphères.	à quatre atmosphères.	à huit atmosphères.
	Décimètres cubes.	Décimètres cubes.	Décimètres cubes.	Décimètres cubes.
Charbon de terre.	17000	8500	4250	2125
Bois.	7650	3825	1912,50	956,25
Tourbe.	6800	3400	1700	850
Charbon de bois.	17800	8900	4450	2225

Ce serait de ces limites dans la quantité de vapeur produite avec un poids donné de combustible, qu'il faudrait chercher à approcher dans la pratique. On pourra voir qu'on en est loin, dans le service ordinaire des machines à vapeur, tant sont considérables les pertes occasionées par les dispositions habituelles des appareils à vapeur. Le temps qu'on met, ainsi que nous l'avons remarqué plus haut, à former la vapeur, influe aussi sur les résultats qu'on obtient de la combustion d'un poids donné

de combustible; mais s'il influe, comme la pratique le montre journellement, c'est encore, en dernier résultat, aux dispositions, ou plutôt aux défauts des appareils ordinaires.

Il résulte de tout ce que nous venons de dire, qu'on a déterminé, par des expériences délicates, la quantité de vapeur que peut produire un poids donné de combustible, lorsqu'il n'y a point de perte sensible de chaleur, et qu'en s'appuyant sur les résultats de ces expériences on pourrait prévoir quel degré de force on produirait à peu près, avec une certaine quantité de combustible brûlé dans un appareil disposé de façon à laisser perdre très-peu de chaleur; mais qu'en général on ne peut connaître *à priori* ce degré de force avec les appareils en usage; il faut les soumettre à des expériences particulières pour être à même de juger ce qu'on peut en attendre.

CHAPITRE XXXXII.

Septième question : *Quels sont les phénomènes que présente, ou auxquels donne lieu la vapeur, lorsqu'elle sort d'une chaudière par divers orifices, et à divers degrés de tension.*

CETTE question se rattache à la théorie générale de la vapeur; mais, pour tâcher de l'éclaircir, suivons pas à pas le phénomène de l'union de la chaleur avec l'eau, sous le point de vue où nous place la question qui nous occupe maintenant.

Supposons qu'on place sur un foyer bien allumé une chaudière *entièrement* remplie d'eau froide, et fermée fortement et hermétiquement.

La combinaison de la chaleur avec l'eau se fera d'autant plus rapidement, que la différence sera plus grande entre la température *de l'espace que la chaudière occupe au-dessus du combustible enflammé*, et la température de la chaudière et de l'eau qu'elle contient : car nous savons qu'entre deux corps en présence et d'inégales températures, les échanges de calorique rayonnant sont d'autant plus rapides, qu'il y a plus de différence entre leurs températures respectives. Il semble dès lors permis de croire que dans les premiers instans de l'exposition de la chaudière à l'action du feu, cette action est à son plus haut point d'intensité, c'est-à-dire qu'alors la combinaison du calorique avec la chaudière et l'eau se fait avec le plus de vivacité ; elle doit se faire plus lentement et par un décroissement graduel d'activité, à mesure que l'appareil s'échauffe.

Or il doit arriver un moment qu'une chaudière entièrement pleine d'eau, comme nous l'avons supposé, prend une température égale à celle de l'espace qu'elle occupe au-dessus du feu : car il ne se forme point de vapeur, faute de place dans la chaudière, et la chaleur peut s'accumuler dans l'eau et les enveloppes qui la contiennent.

Parvenu à ce point, l'appareil ne peut plus augmenter de température, si la chaleur du foyer reste constante ; et l'action prolongée de celui-ci n'a plus pour objet que d'entretenir la température communiquée ; mais quelle peut être la quantité de chaleur nécessaire pour maintenir cette température ? précisément la quantité que perd l'appareil par le rayonnement dans l'espace, et par son contact avec les corps peu conducteurs dont se compose le fourneau. Cette quantité peut être très-faible, en comparaison de celle qui s'est combinée avec l'eau, au commencement de l'opération ; et il suit de là que la *puissance calorifiante* du foyer doit se dissiper inutilement

presque en totalité, lorsque la température de notre chaudière est à son *maximum*; cependant la dépense de combustible, la vivacité du feu, doivent rester au même point d'élévation; sans quoi la température de la chaudière baisserait.

Il faut remarquer que le degré de température, auquel l'eau de la chaudière parvient, dépend de la grandeur relative de la masse en combustion : avec un petit foyer et une grande chaudière remplie d'eau, le *maximum* de chaleur auquel celle-ci pourra parvenir ne sera jamais très-élevé, eu égard à ce qu'il peut être dans un cas contraire, bien que la chaudière soit fermée hermétiquement et que le petit feu reste dans une activité constante. Cette remarque trouvera plus loin son application.

Supposons maintenant qu'au lieu de remplir notre chaudière entièrement d'eau, nous ne la remplissions, par exemple, qu'aux neuf dixièmes; qu'un dixième de sa capacité reste vide; nous la supposons encore fermée hermétiquement.

Dans ce cas-ci, il y a de la vapeur qui se forme pour remplir l'espace vide; mais comme en se formant, elle rend latente une quantité de calorique considérable, calorique qu'elle enlève à l'eau et à la chaudière, il paraît évident qu'il est passé plus de chaleur du foyer dans l'appareil pour faire arriver celui-ci au degré de température de l'espace qu'il occupe au-dessus du feu, lorsqu'il se forme de la vapeur, que quand il ne s'en forme pas. Il est évident encore que la production graduelle de la vapeur, qui a lieu dans la chaudière, maintient plus long-temps l'inégalité de température qui doit régner entre l'*espace calorifiant* et la chaudière, pour que la chaleur du foyer soit utilement employée sur notre appareil.

Cependant, comme la vapeur n'a qu'un dixième de la capacité à occuper, sa température et sa tension augmentent assez

rapidement; et si la chaudière est suffisamment forte, eu égard à la puissance du foyer, l'inégalité de température dont il est fait mention ci-dessus finira par disparaître; l'équilibre du calorique aura lieu, et le feu n'aura plus d'effet utile sur la chaudière.

Nous voyons clairement dès lors que si, mettant moins d'eau dans la chaudière, on y laisse plus de vide, la vapeur aura plus d'espace pour se répandre; plus de calorique sera enlevé à l'eau sous forme latente, et plus de chaleur sera utilement employée.

Ceci toutefois ne peut être vrai que dans certaines limites : rappelons-nous la loi de propagation du calorique dans les liquides, et nous comprendrons que, pour combiner beaucoup de chaleur avec l'eau de notre chaudière, il faut multiplier autant que possible les points de contact du liquide avec ceux de son enveloppe; ce qui assurément n'aurait pas lieu si on ne mettait que très-peu d'eau dans une chaudière d'une grande capacité.

Nous avons supposé jusqu'à présent que la chaudière était hermétiquement fermée, et que par conséquent elle perdait peu de chaleur; il s'agit maintenant d'examiner ce qui doit se passer si nous pratiquons et ouvrons un orifice sur notre chaudière.

Admettons d'abord que la chaudière soit remplie d'eau, et que l'orifice soit très-grand par rapport à la surface du liquide qu'elle renferme, qu'il soit le quart, par exemple; nous savons que l'eau ne dépassera pas le terme de l'ébullition, par ce que la vapeur, qui se dissipe au fur et à mesure qu'elle se forme, emporte avec elle autant de chaleur que le foyer peut lui en donner.

Faisons l'orifice beaucoup plus petit, supposons de $\frac{1}{1000}$ de la surface du liquide dans la chaudière, exposée à un aussi grand feu qu'elle peut comporter : la température de l'eau s'élèvera

bien au-dessus de celle qui correspond au terme de l'ébullition; ce ne sera plus la vapeur seule qui sortira de l'orifice, mais un jet d'eau et de vapeur; la température s'élèvera, parce qu'en un temps donné il ne sortira pas assez de vapeur à 100 degrés par ce petit orifice pour épuiser tout l'effet de la puissance du foyer; l'eau jaillira avec la vapeur par la force de dilatation que l'accumulation du calorique développe entre ses molécules. L'eau devient pour ainsi dire, comme une sorte de vapeur d'une grande densité relative, qui jouit d'une force d'expansion analogue à celle de la vapeur même.

Voilà pour ce qui regarde une chaudière pleine d'eau; voyons une chaudière dans laquelle on laisse un espace vide, pour y recevoir la vapeur.

Plusieurs choses influent ici sur le phénomène qui fait le sujet de ce chapitre, ainsi que sur l'état de la vapeur, savoir: 1°. le degré de puissance calorifiante du foyer, eu égard à la grandeur de la chaudière et de la masse d'eau qu'elle renferme; 2°. la quantité d'espace vide laissé dans la chaudière; 3°. l'étendue de la surface de l'eau exposée au feu; 4°. la dimension de l'orifice par lequel la vapeur doit sortir; 5°. enfin la manière de la faire sortir.

Un foyer donné de dimensions a une *puissance calorifiante* limitée, et lorsque le combustible qu'il peut recevoir brûle aussi parfaitement, se consomme avec autant d'activité que possible, cette puissance est à son *maximum*. Or la masse d'eau qu'on expose à son action peut être telle, en grandeur relative, que le calorique émané du foyer ne suffirait pas pour porter le liquide à l'ébullition, bien que le foyer fût constamment entretenu : ce n'est pas qu'au bout d'un certain temps il ne se serait développé assez de chaleur pour représenter celle qu'exigerait l'ébullition de toute la masse d'eau dont il est question;

mais, sans compter les pertes de chaleur inhérentes à la constitution même d'un foyer quelconque, il y aurait incessamment une déperdition de chaleur et par les parois de la chaudière et par la faible vapeur qui sortirait de son orifice et se mêlerait à l'air ambiant; déperdition telle, qu'avant d'arriver à l'ébullition, la chaudière dépenserait tout ce qu'elle pourrait recevoir de chaleur du foyer. Exposez à la chaleur d'une lampe quelques grammes d'eau dans un petit vase; vous les porterez d'autant plus aisément à l'ébullition qu'il y en aura moins; vous n'y parviendriez pas si vous opériez sur 10 litres d'eau.

Cependant le foyer peut être tel, avec une masse d'eau et un orifice à vapeur donnés, ou que vous ne pourriez pas dépasser le terme de l'ébullition, quelle que fût la vivacité du feu, ou que vous dépasseriez nécessairement ce terme, en entretenant le feu au degré d'intensité qu'il avait au moment de l'ébullition.

Dans le premier cas, la quantité de chaleur que recevrait la chaudière à chaque instant, avant l'ébullition, étant plus grande que celle qui s'en échappe aussi à chaque instant avant ce terme, vous arriveriez à l'ébullition, et vous y arriveriez d'autant plus tôt que la différence entre les quantités de chaleur affluentes et les quantités émanées est plus grande : mais au moment de l'ébullition, la quantité de vapeur qui sort, sans interruption, de l'orifice (que nous supposons même petit en comparaison de la surface du liquide), entraîne avec elle une si grande dose de chaleur que l'égalité s'établit, à ce terme, entre les quantités reçues et les quantités dissipées.

Dans le second cas, l'affluence du calorique est si grande, en comparaison de ce que peut perdre l'appareil avant l'ébullition, et celle-ci est si vive à sa naissance, tant de vapeur se forme à l'instant, qu'elle ne peut sortir assez tôt par l'orifice; elle se replie donc sur elle-même au-dessus de l'eau qui la fournit, et la

température s'élève, jusqu'à ce que la différence entre la température de l'appareil et celle de l'espace qu'il occupe dans le foyer ne soit plus assez grande pour qu'il entre dans la chaudière plus de calorique qu'il n'en sort par l'orifice avec la vapeur.

Le peu d'espace qu'on aurait laissé vide dans la chaudière influerait faiblement dans le premier cas, à moins que l'orifice de sortie ne fût précisément le plus petit qu'on pût admettre, sans être dans le cas de dépasser le terme de l'ébullition; car alors il se pourrait que la quantité de vapeur formée, manquant de place, et ne pouvant sortir assez précipitamment, augmenterait de température et de tension.

Mais dans le second cas, la petitesse relative de cet espace influera non-seulement sur la promptitude avec laquelle l'appareil arrivera à son *maximum* de température, mais apportera encore plus ou moins de trouble dans la production et la sortie de la vapeur, ainsi que nous en avons déjà fait la remarque plus haut.

Au surplus, la masse de vapeur, produite dans un temps donné, dépend en partie de l'étendue de la surface liquide exposée à l'action du feu; et la température qu'acquerra l'appareil ainsi que l'eau qu'il renferme dépend des dimensions de l'orifice de sortie; on en concevra aisément la raison, si l'on veut se rappeler ce qui a été dit précédemment.

Il y a deux manières de faire sortir la vapeur d'une chaudière, ou par *bouffées intermittentes*, ou par un *jet continu*.

Pour former un volume donné de vapeur à un degré de tension quelconque, il faut nécessairement un certain temps; la combinaison de calorique et d'eau, qui la constitue, n'est jamais et ne peut être subite : ce temps est d'autant plus long, pour la formation d'un poids donné de vapeur, que la puissance calori-

fiante du foyer est plus *petite* comparativement à la masse qu'il faut échauffer.

Si donc on voulait produire un certain volume de vapeur, à une atmosphère de tension par exemple, et que le temps, nécessaire à la production, n'entrât pour rien dans les vues qu'on se proposerait, il est certain qu'un très-petit feu, sous une masse d'eau assez grande, pourrait suffire, si les dimensions respectives étaient telles que, lorsqu'on tiendrait la vapeur emprisonnée dans l'espace vide de la chaudière, en fermant l'orifice de sortie, l'eau pût simplement entrer en ébullition. En n'ouvrant l'orifice qu'à des intervalles de temps plus ou moins rapprochés, pour laisser sortir la vapeur par bouffées, on en obtiendrait un certain volume, à la tension demandée, mais l'on remarquerait que la température baisserait promptement dans la chaudière, et qu'il faudrait bientôt refermer l'orifice pour donner le temps à une nouvelle quantité de vapeur de se reformer. Votre force a donc ici d'autant moins de valeur, d'autant moins de puissance, qu'il vous faudra plus de temps pour reformer le volume de vapeur en question, ou, en d'autres termes, que la puissance calorifiante est plus petite.

Supposons que le volume de vapeur qu'on veut former soit de 1000 décimètres cubes, et qu'il soit question de l'introduire dans un cylindre vide, ayant cette capacité; d'y faire régner, par cette vapeur, une tension égale à une atmosphère; et enfin, après cela, de détruire toute la vapeur introduite.

Si, d'après l'hypothèse ci-dessus, votre appareil était établi de manière qu'il fallût fermer préalablement toute issue à la vapeur, pour pouvoir porter l'eau à l'ébullition, il est clair que vous ne parviendriez à remplir le cylindre de vapeur à une atmosphère de tension, qu'après avoir élevé la température de la chaudière au-dessus de 100 degrés, et d'autant plus haut que

la chaudière aurait moins de capacité, eu égard à celle du cylindre qu'il faut remplir de vapeur.

Vous attendriez donc que vous fussiez arrivé à un certain degré de température au-dessus de l'ébullition, pour ouvrir l'orifice et introduire une bouffée de vapeur dans le cylindre. Si la température est assez élevée, vous obtenez la pression requise; si elle ne l'est pas, la pression est au-dessous d'une atmosphère; si elle l'est plus qu'il ne convient, la pression reste plus forte dans le cylindre, toutes causes de condensation étant, bien entendu, écartées. Dans tous les cas la température baissera dans la chaudière, à raison du calorique que la bouffée de vapeur en emportera; et vous ne pourrez recommencer une nouvelle introduction que lorsque vous aurez reporté la chaudière à la température primitive; l'intervalle de temps qui séparera chaque introduction, vous donnera la mesure de la quantité de travail que vous pourrez obtenir de cette force.

Supposons maintenant que l'appareil soit tel que la masse d'eau puisse bouillir, l'orifice étant ouvert, comme cela a lieu ordinairement.

Fermez cependant cet orifice jusqu'au moment d'une ébullition complète; ouvrez-le alors et remplissez votre cylindre de vapeur; il pourra arriver de trois choses l'une : ou la vapeur introduite n'aura qu'à peine la tension requise; ou elle l'aura d'une manière décidée et la conservera à chaque introduction; ou enfin la tension augmentera après la deuxième, la troisième, la quatrième introduction, etc.

Dans le premier cas, la tension de la vapeur s'affaiblira par son expansion dans le cylindre, si, pendant le temps que l'orifice reste ouvert, la chaudière ne produit pas assez de vapeur pour saturer l'espace ainsi agrandi, et pour fournir à la perte de calorique qui se fait par la surface du cylindre; il faudra laisser pen-

dant très-long-temps la communication ouverte entre la chaudière et le cylindre pour saturer celui-ci de vapeur à 100 degrés centigrades ; et ce ne sera que de loin en loin que vous pourrez renouveler une introduction, après avoir détruit le premier volume de vapeur introduit. Ce que vous obtiendriez ainsi pourait à peine porter le nom de force ; et il serait évident qu'il existerait dans votre appareil une disproportion trop grande entre la puissance calorifiante et la quantité de vapeur qu'on veut obtenir à chaque introduction.

Dans le second cas, cette disproportion n'existe point, et il vous est permis d'enlever de la chaudière, à des intervalles assez rapprochés, le volume de vapeur en question. Le temps que vous mettez entre chaque introduction vous donne la mesure de celui qu'il faut au foyer pour combiner avec l'eau la quantité de chaleur nécessaire à la formation d'un volume de vapeur de 1000 décimètres cubes.

Et si vous vouliez raccourcir les intervalles qui séparent les introductions, il est clair que vous affaibliriez la tension de la vapeur, et dans le cylindre et dans la chaudière, parce que la combinaison de calorique et d'eau n'aurait plus le temps de se faire en aussi grande quantité.

Le troisième cas arriverait, si vous mettiez plus d'intervalle qu'il n'en faut entre les introductions successives ; car, n'épuisant pas toute la vapeur produite dans ce temps, vous la forcez à se replier sur elle-même dans la chaudière, et la température de celle-ci et de la vapeur augmente. C'est alors que, dans la pratique, on modère l'action du feu ; c'est alors qu'on pourrait dire que la puissance calorifiante est trop forte et le foyer hors de proportion avec la quantité de vapeur à produire, si toutefois les temps d'introduction sont aussi rapprochés qu'ils doivent l'être pour le service qu'on attend de la force motrice de la vapeur.

Ce que nous venons de dire sur la sortie de la vapeur *par bouffées*, peut s'appliquer au cas où elle sortirait sans interruption d'un orifice quelconque et à divers degrés de tension; mais ce cas mérite d'être considéré sous un autre point de vue, et c'est ce que nous allons faire dans l'examen des deux questions qui seront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE XLIII.

Huitième et neuvième questions. *Une chaudière étant donnée avec la quantité d'eau requise, combien sortirait-il de vapeur en un certain temps par divers orifices, et à quels degrés de tension?*

Dans quel rapport doit être la grandeur de l'orifice de sortie avec la capacité de la chaudière, pour obtenir toujours une vapeur au même degré de tension?

Plusieurs élémens principaux entrent nécessairement dans la solution de ces questions, savoir : 1°. la quantité de chaleur qui afflue, en un temps donné, dans la masse d'eau exposée à son action; 2°. la surface de l'eau en contact avec le feu; 3°. la grandeur de l'orifice comparée avec cette surface; 4°. la vitesse de la vapeur, lorsqu'elle s'échappe de cet orifice; 5°. enfin la densité de la vapeur sortante.

Ces questions, si simples en apparence, deviennent très-compliquées, si l'on considère la part active que chacun de ces élémens prend dans la production de l'effet qu'on a en vue, et nous ne pensons pas qu'il soit possible de les résoudre *à priori*, d'une manière satisfaisante. Il faut donc en chercher la solution dans les résultats d'expériences directes sur cette matière.

Il se peut que des expériences de ce genre aient été faites; mais nous en avons vainement cherché les traces, pour y recourir, pour nous en appuyer dans notre travail; il a fallu dès lors nous livrer nous-mêmes à une suite de recherches expérimentales sur ce sujet. Que nous ayons les premiers ouvert la carrière, ou que nous n'ayons fait que répéter, sans le savoir, les expériences de ceux qui ont pu étudier cette matière avant nous, c'est un point fort peu important à décider; l'essentiel est d'accumuler les faits dans une science qui ne peut s'étendre et se perfectionner que par des faits soigneusement observés et fidèlement rapportés.

Voici donc comment nous avons procédé, et une suite de résultats de nos expériences.

On s'est servi d'une chaudière de fonte fort épaisse, fermant bien exactement par un couvercle de même matière, rodé sur ses bords avec ceux de la chaudière et solidement fixé par plusieurs boulons. On avait eu l'attention en outre de faire le joint du couvercle et de la chaudière avec du carton graissé; on s'est assuré ainsi d'une fermeture parfaitement exacte.

Un thermomètre centigrade pénétrait dans l'intérieur de la chaudière, par une boîte à étoupes, ajustée avec soin sur le couvercle.

Un petit bout de tuyau, venu de fonte avec le couvercle, s'élevait au milieu de celui-ci; il portait une bride sur laquelle on fixait successivement des plaques de cuivre présentant des orifices de diverses formes ou dimensions.

Un petit cylindre solide de cuivre, suspendu au bout d'un fil de cuivre très-fin, et attaché à un levier d'équilibre, servait de flotteur et indiquait le niveau de l'eau dans la chaudière; on était ainsi à même de juger des quantités d'eau évaporées. Un petit manchon de toile métallique recevait le flotteur dans l'in-

térieur de la chaudière, et le maintenait en repos, malgré les secousses de l'ébullition.

Un autre tuyau débouchant près du fond de la chaudière, traversait le couvercle sur lequel il était bien joint par une bride à vis et à garniture, et allait communiquer avec un corps de pompe foulante destinée à fournir de l'eau à la chaudière.

La surface totale intérieure de la chaudière était de 36,[décimètres carrés]40.

10 litres d'eau, qui étaient la charge ordinaire de la chaudière, répondaient à une portion de surface intérieure de cette chaudière, égale à 189382 millimètres carrés; c'est-à-dire *que la surface de l'eau en contact avec les parois de la chaudière était représentée par ce dernier nombre.*

Le foyer était aussi grand que la chaudière pouvait le comporter par ses dimensions, et disposé de manière que la flamme circulait à l'entour de la chaudière avant de passer dans la cheminée.

Le tirage du fourneau était parfait; on le modérait à volonté et fort aisément.

Sans eau, le fond de la chaudière aurait pu assurément rougir très-fortement, avec le feu qu'on pouvait faire.

Dans le cours des expériences, lorsque le feu était poussé à son *maximum*, le tuyau de tôle formant la base de la cheminée était constamment rouge, à près de 4 décimètres de hauteur.

Première série d'expériences pour déterminer les quantités d'eau qui s'écoulent en vapeur de la chaudière ci-dessus, par divers orifices, avec le feu le plus fort qu'on pût entretenir dans le fourneau, et qu'on maintenait avec grand soin à ce degré d'intensité.

1°. *Ouverture rectangulaire de* 12 *millimètres de longueur sur* 3 *de largeur.*

Le baromètre marquait 765 millimètres. Il résulte de 12 expériences que la température de l'eau et de la vapeur est restée dans la chaudière à 105°5 centigrades. On n'a pu parvenir à l'élever plus haut, avec l'orifice ci-dessus, et avec un feu entretenu à son *maximum* d'intensité. Cet orifice était donc assez grand, relativement à la quantité de vapeur produite, pour ne pas permettre à ce fluide de se comprimer davantage sur lui-même.

Un litre, ou ce qui est la même chose, un kilogramme d'eau s'est dissipé en vapeur à la température ci-dessus, *en trois minutes.*

2°. *Ouverture rectangulaire de* 6 *millimètres de longueur sur* 3 *de largeur.*

Baromètre comme ci-dessus. La température de l'eau et de la vapeur, avec la même violence de feu, n'a pas dépassé, terme moyen, pour le nombre ci-dessus d'expériences, 115 degrés centigrades.

Un litre d'eau s'est dissipé en vapeur *en trois minutes.*

3°. *Ouverture rectangulaire de* 3 *millimètres de longueur sur* 3 *de largeur.*

Baromètre comme ci-dessus. La température de l'eau et de la vapeur, avec la même violence de feu, n'a pas dépassé, terme moyen, 138 degrés centigrades.

Un litre d'eau s'est dissipé en vapeur *en trois minutes.*

4°. *Ouverture circulaire de 25 millimètres de diamètre.*

Baromètre comme ci-dessus. Avec la même violence de feu, la température de l'eau et de la vapeur n'a pu s'élever au-dessus de 100 degrés centigrades.

Un litre d'eau s'est dissipé en vapeur, *en trois minutes.*

5°. *Ouverture circulaire de* 12$^{mill.}$,5 *de diamètre.*

Baromètre comme ci-dessus. Avec la même violence de feu, la température n'a pas dépassé, terme moyen, 101 degrés centigrades.

Un litre d'eau s'est dissipé en vapeur, *en trois minutes.*

6°. *Ouverture circulaire de* 6$^{mill.}$,25 *de diamètre.*

Baromètre comme ci-dessus. La température n'a pas dépassé, terme moyen, 112 degrés centigrades.

Un litre d'eau s'est dissipé en vapeur, *en trois minutes.*

7°. *Le couvercle de la chaudière étant ôté.*

Baromètre comme ci-dessus. Le même feu; température, 100 degrés centigrades.

9 litres d'eau ont été évaporés en 27 $\frac{1}{2}$ minutes, ou un litre d'eau *en trois minutes* à peu près.

Cette première série d'expériences peut donner lieu à plusieurs remarques importantes; nous nous bornons aux suivantes.

1°. Une chaudière étant donnée, avec un foyer entretenu au même degré d'intensité, ou, en d'autres termes, avec *une puissance calorifiante* constante, on en obtient le même poids de vapeur, en un certain temps, quelles que soient les dimensions de l'orifice par lequel la vapeur s'échappe; qu'ainsi on évapore, en une minute par exemple, autant d'eau par un petit orifice que par un grand; seulement la densité, et par conséquent la température et la tension de la vapeur sortante, varient suivant les dimensions de l'orifice.

D'où il suit qu'avec un feu entretenu au même degré d'intensité, il suffit, pour faire varier la tension de la vapeur, d'augmenter ou de diminuer, d'une certaine quantité, l'orifice de sortie; mais comme le feu doit rester le même, et qu'on évapore autant d'eau, dans le même temps, quel que soit l'orifice, il semble évident que les dépenses qu'il faut faire pour produire de la vapeur, sont sensiblement les mêmes, soit qu'on forme de la vapeur à une atmosphère de pression, ou qu'on en forme à plusieurs atmosphères; dans la pratique, on peut regarder cette assertion comme exacte.

2°. Si, comme il y a lieu de le croire, la quantité de vapeur, produite en un temps et avec une puissance calorifiante donnés, est proportionnelle à la surface de l'eau en contact avec les parois d'une chaudière exposée à l'action du feu; et puisque, d'après nos expériences, les orifices, variant dans leurs rapports avec cette surface, ne peuvent fournir, avec du feu au *maximum* d'intensité, que de la vapeur à des degrés de tension déterminés par les dimensions relatives des orifices, il semble qu'on peut établir quel doit être le rapport de la surface du plus petit orifice possible avec celle de l'eau exposée au feu, pour n'avoir, par exemple, que de la vapeur à 100 degrés, ou à toute autre température plus élevée, même en chauffant au *maximum*.

On voit, dans nos expériences, qu'avec une surface d'eau de 189382 millimètres carrés, un orifice circulaire d'environ 491 millimètres carrés (voyez 4e. expérience) dépense toute la vapeur qui se forme à 100 degrés centigrades, et ne permet pas à l'eau de s'élever au-dessus de cette température; on voit aussi (expérience 5e.) qu'avec un orifice circulaire de 123 millimètres carrés de surface, on ne peut élever la température qu'à 101° centigrades. C'est donc entre une aire de 491 millimètres carrés d'ouverture et une de 123, que se trouve la limite

du plus petit orifice possible, pour n'obtenir avec notre chaudière qu'une vapeur à 100 degrés centigrades.

Or le rapport du premier nombre avec celui qui exprime la surface de l'eau de notre chaudière, est comme 1 à 386 environ, et le second à peu près comme 1 à 1544; il s'ensuivrait donc que de l'eau qui occuperait dans une chaudière une surface, par exemple, de 386 décimètres carrés, exposée au feu le plus fort, ne pourrait fournir, en jet continu, et par un orifice d'un décimètre carré de surface, que de la vapeur à 100 degrés centigrades, et une surface de 1544 décimètres carrés que de la vapeur à 101 degrés centigrades, par le même orifice. D'où l'on pourrait conclure que l'aire d'ouverture la plus petite possible pour ne produire, en jet continu, que de la vapeur à 100 degrés centigrades, devrait être à peu près la 1000me. ou la 1200me. partie de la surface de l'eau exposée au feu.

On trouverait de même que si l'aire de l'orifice était environ la 5260me. partie de la surface de l'eau exposée au feu, on n'obtiendrait, avec un feu très-fort, qu'une vapeur de 105 ^{degrés} 5 centigrades de température (voy. exp. 1re.);

Qu'avec un orifice qui serait la 10521me. partie de cette surface, on aurait une température de 115 degrés centigrades (expérience 2e.);

Enfin qu'avec un orifice qui serait la 21042me. partie environ de cette surface, on arriverait à 138 degrés centigrades (expérience 3e.).

3e. Il existe peut-être une loi de décroissement d'ouverture qui se lie avec l'accroissement de température de la vapeur : si on parvenait à la connaître, on pourrait déterminer quelle ouverture il faudrait pratiquer sur une chaudière donnée, pour ne pas dépasser, avec le feu le plus fort, certain degré de température, la vapeur sortant en jet continu. Nos expériences, bien que nom-

breuses, n'ont pas été poussées assez loin pour chercher à reconnaître cette loi dans les résultats qu'elles nous offrent; ces résultats néanmoins nous paraissent applicables dans les limites et surtout pour les nombres notés dans ces expériences.

4°. Elles semblent nous permettre en outre de déterminer quelle quantité de vapeur l'on peut produire, en un certain temps, avec une chaudière donnée, exposée à l'action du feu le plus fort qu'on puisse faire dans un fourneau ordinaire.

Nous voyons, en effet, qu'avec une surface d'eau de 189382 millimètres carrés nous évaporons un litre d'eau, ou, si l'on veut, que nous produisons un kilogramme de vapeur en trois minutes; ce qui revient à dire que 189 à 190 millimètres carrés de surface d'eau en contact avec les parois d'une chaudière, *exposée à un feu entretenu à son maximum d'intensité, et le plus fort que la dimension de cette chaudière puisse comporter*, produisent un gramme de vapeur en trois minutes; ou bien que 568 millimètres carrés environ de surface produiront un gramme de vapeur en une minute; ou bien encore, en nombres ronds, que 6 centimètres carrés de surface produiront un gramme de vapeur en une minute.

Appliquons maintenant cette règle qui paraît suffire pour la pratique.

Supposons une chaudière rectangulaire à fond plat de 3 mètres de longueur, de 2 mètres de largeur et de 2 mètres de hauteur, remplie d'eau à moitié; la surface de l'eau en contact avec le feu, en y comprenant, bien entendu, ce qui touche le fond et les parois, sera de 16 mètres carrés ou de 160000 centimètres carrés; divisant donc ce dernier nombre par 6, vous aurez pour quotient le nombre de grammes de vapeur produite en une minute; et ce quotient est 26^{kil},666.

Cette quantité de vapeur produite est considérable; mais il

ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit ici *du feu le plus fort* qu'on puisse employer sous une chaudière; ce qui n'a pas ordinairement lieu dans la pratique actuelle; et il faut considérer un gramme de vapeur produit en une minute par 6 centimètres carrés de surface d'eau, comme un *maximum*. Habituellement, c'est-à-dire avec un feu ordinaire, qu'on entretient sans trop le pousser, *on n'obtient qu'entre la moitié et le tiers de la quantité ci-dessus, dans le même temps.*

5°. Enfin on peut déduire encore des résultats de cette première série d'expériences, le moyen de reconnaître *approximativement* si la *puissance calorifiante* à l'action de laquelle une masse d'eau est exposée dans une chaudière, est telle qu'on puisse obtenir le *maximum* de production de vapeur dont nous venons de faire mention.

Nous avons vu, dans ces expériences, qu'avec une aire d'ouverture égale à la 5260me. partie de la surface de l'eau exposée au feu, on n'obtient, dans la chaudière, qu'une température de 105 degrés, 5 centigrades.

Or, si nous divisons la surface de 160,000 centimètres carrés trouvés pour la chaudière que nous venons de donner en exemple, par 5260, le quotient nous montrera qu'avec un orifice dont l'aire serait égale à 30 centim. carrés,4 environ, et par lequel la vapeur sortirait sans interruption, l'eau de cette chaudière ne devrait s'élever qu'à 105 degrés, 5 centigrades, même avec le feu le plus fort.

Si donc on arrive à cette température avec la chaudière en question, munie d'un orifice de 30 centim. carrés,4 d'ouverture, la puissance calorifiante semble devoir être considérée comme pouvant produire, en une minute, un gramme de vapeur par 6 centimètres carrés de surface d'eau en contact avec les parois de la chaudière.

Mais si l'on ne parvenait pas à cette température, qu'on restât, par exemple, à 101 degrés centigrades, quelle sera la quantité de vapeur produite en une minute? les expériences suivantes nous mettront peut-être sur la voie pour résoudre approximativement cette question.

Deuxième série d'expériences pour déterminer le temps de l'écoulement d'un litre d'eau en vapeur, par divers orifices, LA TEMPÉRATURE MOYENNE DE L'EAU DANS LA CHAUDIÈRE AYANT ÉTÉ MAINTENUE A 101 DEGRÉS CENTIGRADES POUR TOUS LES ORIFICES.

1°. *Ouverture rectangulaire de* 12 *millimètres de longueur sur* 3 *de largeur.*

Baromètre, 767 millimètres. La durée moyenne de l'évaporation d'un litre d'eau, par cette ouverture a été *de* 8 *minutes et demie.*

2°. *Ouverture rectangulaire de* 6 *millimètres de longueur sur* 3 *de largeur.*

Baromètre, idem. La durée moyenne de l'évaporation d'un litre d'eau, par cette ouverture, a été de 18 *minutes.*

3°. *Ouverture rectangulaire de* 3 *millimètres de longueur sur* 3 *de largeur.*

Baromètre, idem. La durée moyenne de l'évaporation d'un litre d'eau, par cette ouverture, a été de 34 *minutes.*

On conçoit que, même avec la plus grande ouverture, dans cette série d'expériences, il a fallu modérer le feu pour ne pas dépasser 101 degrés centigrades, aussi la durée de l'évaporation d'un litre d'eau est-elle près de *trois fois* plus grande que dans l'expérience correspondante de la première série.

D'où il résulte qu'avec un orifice dont l'aire est la 5260me. partie de la surface de l'eau exposée au feu, et avec un feu assez modéré pour ne pas donner à la vapeur une température

de plus de 101 degrés centigrades, 6 centimètres carrés de surface n'évaporeraient un gramme d'eau qu'en trois minutes à peu près. C'est le résultat qu'on obtient ordinairement quand la puissance calorifiante n'est pas portée au *maximum* pour une chaudière ordinaire, en un mot quand on modère le feu. Si cependant on obtenait sensiblement moins de vapeur, on pourrait dire que la puissance calorifiante serait trop faible en comparaison de la masse d'eau à échauffer. On ne doit donc pas rester au-dessous de cette limite.

Il nous semble résulter encore de cette série d'expériences, qu'à une même température la durée de l'écoulement d'un poids donné de vapeur est à peu près réciproquement proportionnelle aux aires des orifices : en effet, il a fallu 8 $\frac{1}{2}$ minutes avec 36 millimètres carrés d'ouverture, 18 minutes ou le double à peu près avec 18 millimètres carrés, et 34 minutes, ou le quadruple environ, avec 9 millimètres carrés d'ouverture.

D'après cette règle on pourrait calculer la durée de l'écoulement, pour d'autres orifices, dans les cas du moins où la vapeur serait maintenue à 101 degrés centigrades de température : il est même très-probable qu'elle s'appliquerait à toute autre température; et qu'en connaissant la durée de l'écoulement par un orifice quelconque, à un certain degré de température, on déterminerait sans erreur grave, par cette règle, la durée de l'écoulement par tout autre orifice, *la température étant maintenue au même degré.*

Il importe de remarquer ici qu'il s'agit toujours d'orifices assez petits pour permettre à l'eau de s'élever au-dessus de 100 degrés centigrades, et non d'orifices assez grands pour produire sur une chaudière le même effet que si elle était toute ouverte. Nous avons vu plus haut qu'à une certaine limite d'ouverture, eu égard à la surface de l'eau exposée au feu, celle-ci tendait à

s'élever et pouvait s'élever au-dessus de 100 degrés, avec un feu convenable; c'est donc à partir de cette limite, jusqu'à l'orifice le plus étroit, que nous entendons qu'on peut employer la règle ci-dessus.

Il s'agit maintenant de savoir quelle est la durée de l'écoulement de la vapeur, par une ouverture et avec une chaudière données, à différens degrés de température; les expériences suivantes semblent devoir nous fournir d'utiles résultats.

Troisième série d'expériences pour déterminer la durée de l'écoulement d'un poids donné de vapeur, par UNE OUVERTURE CONSTANTE DE 9 MILLIMÈTRES CARRÉS, A DIFFÉRENS DEGRÉS DE TEMPÉRATURE.

Baromètre, 762 millimètres.

1°. *La vapeur marquant dans la chaudière* 105 *degrés centigrades de température moyenne.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, *en* 13 *minutes.*

2°. *La vapeur marquant* 110 *degrés centigrades de température moyenne.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, *en* 8 $\frac{1}{2}$ *minutes.*

3°. *La vapeur marquant* 115 *degrés centigrades de température moyenne.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, en 6 $\frac{1}{6}$ *minutes.*

4°. *La vapeur marquant* 120 *degrés centigrades.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, *en* 5 $\frac{1}{6}$ *minutes.*

5°. *La vapeur marquant* 125 *degrés centigrades.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, *en* 4 $\frac{1}{2}$ *minutes.*

6°. *La vapeur marquant* 130 *degrés centigrades.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, *en* 3 $\frac{3}{4}$ *minutes.*

7°. *La vapeur marquant* 135 *degrés centigrades.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, *en* 3 *minutes.*

Quatrième série : mêmes expériences que les précédentes ; on augmente la température de 10 *en* 10 *degrés centigrades.*

1°. *La vapeur marquant* 100 *degrés centigrades.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, *en* 40 *minutes.*

2°. *La vapeur marquant* 110 *degrés centigrades.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, *en* 8 $\frac{3}{4}$ *minutes.*

3°. *La vapeur marquant* 120 *degrés centigrades.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, *en* 5 $\frac{1}{2}$ *minutes.*

4°. *La vapeur marquant* 130 *degrés centigrades.*

Un kilogramme de vapeur s'est écoulé, terme moyen, en 4 *minutes.*

Il faut se rappeler que l'aire de l'orifice dont on s'est servi pour les expériences ci-dessus, est à la surface de l'eau exposée au feu, comme 1 est à 21042 à peu près; or, comme la durée de l'écoulement est en raison inverse de l'aire de l'orifice, pour une température entretenue constamment au même degré, il sera facile de déterminer approximativement la quantité de vapeur qui doit s'écouler d'une chaudière donnée aux divers degrés de température notés dans ces expériences.

Ainsi, par exemple, *dans le rapport ci-dessus de l'aire de l'orifice avec la surface de l'eau*, si la température s'élève à un

des degrés quelconque notés ci-dessus, la durée de l'écoulement avec la chaudière donnée se trouvera par la proportion suivante : 189382 millimètres carrés (qui représentent la surface d'eau exposée au feu dans nos expériences) produisant un kilogramme de vapeur, en 13 minutes, à 105° centigrades, en 8 $\frac{1}{7}$ minutes à 110 degrés, en 6 $\frac{1}{6}$ à 115 degrés, etc., combien en produira la surface de l'eau en contact avec les parois de la chaudière que l'on emploie, aux mêmes degrés de température?

Par cette règle nous pouvons juger approximativement de la valeur d'une puissance calorifiante employée, eu égard à la quantité de vapeur qu'elle est en état de produire en un temps donné.

Nous voyons en effet que, dans nos expériences précédentes, la valeur de la puissance calorifiante, qui correspond à chacune, varie et opère la production d'une même quantité de vapeur en des temps divers. Toutes les fois donc qu'on se mettra dans les mêmes conditions que celles dans lesquelles nous nous sommes placés pour faire ces expériences, c'est-à-dire qu'on aura le même rapport d'ouverture avec la surface de l'eau en contact avec la chaudière, et qu'en outre on aura l'un des degrés de température auxquels nous avons opéré, les résultats de ces expériences semblent devoir être des données suffisantes pour évaluer la quantité de vapeur qu'on obtiendra avec la puissance calorifiante qu'on se propose d'employer.

La production de vapeur croît rapidement, comme ces expériences le font voir, avec l'accroissement de la puissance calorifiante (1) : à 100 degrés la durée de l'écoulement d'un

(1) Nous n'entendons pas par puissance calorifiante, une masse de combustible enflammé plus ou moins grande, mais la qualité du feu, modéré ou violent, et qui se reconnaît à la quantité de vapeur produite en un temps par une ouverture et avec une chaudière données.

kilogramme de vapeur est de 40 minutes, et à 120 degrés elle n'est que de 5 $\frac{1}{4}$ minutes; mais il faut remarquer qu'à cette dernière température, la vapeur n'a pas seulement une pression presque double, mais encore une densité à peu près double aussi; de sorte qu'un nombre double de molécules passent à la fois par la même ouverture avec une vitesse beaucoup plus grande.

Il serait superflu d'insister sur l'usage, sur les applications qu'on peut faire très-aisément des résultats fournis par les expériences précédentes; mais nous ne pouvons nous dispenser de rapporter, pour terminer ce que nous avons à dire sur la double question qui vient d'être traitée, les résultats de quelques autres expériences que nous avons tentées principalement dans la vue de connaître à quel degré de l'échelle du thermomètre centigrade peut correspondre la puissance calorifiante d'un feu ordinaire, sur lequel une chaudière, pleine d'eau, est placée.

Pour cela on s'est servi de deux vases cylindriques de fer-blanc; la surface du fond de l'un était à celle du fond de l'autre comme 1 est à 2; du reste ils étaient de même hauteur.

Leurs orifices respectifs étaient dans un tel rapport avec la surface de l'eau exposée au feu, qu'un feu de charbon de bois bien allumé et présentant assez de surface pour dépasser la circonférence du fond du plus grand des deux vases, portait la température de l'eau à 101 degrés centigrades.

On mettait dans chaque vase la même hauteur d'eau.

Pour connaître, avec exactitude, la quantité de vapeur produite, en un temps donné, on avait suspendu le vase à l'extrémité d'un des bras d'une balance, et l'on jugeait aisément quand un kilogramme de vapeur était écoulé.

Le grand vase placé sur le feu de charbon a fourni un kilo-

gramme de vapeur *en* 20 *minutes*, à 100° $\frac{1}{2}$ centigrades, terme moyen.

Le petit vase, placé sur le même feu, a fourni un demi-kilogramme de vapeur, à 100° $\frac{1}{2}$ centigrades, *en* 23 *minutes*.

On a ensuite suspendu successivement les deux vases, sur un bain d'huile, avec les mêmes quantités d'eau, dans les mêmes conditions; il n'y avait de changé que la forme, si on peut le dire, de la puissance calorifiante; le fond seul des vases touchait la surface de l'huile; et pour éviter le contact de l'air froid avec la paroi de ces vases, une plaque de tôle, percée pour laisser passer la tubulure des vases, recouvrait le bain d'huile.

Lorsque la température de ce bain d'huile est parvenue à 216 degrés centigrades, le premier vase a fourni un kilogramme de vapeur *en* 20 *minutes et demie*, terme moyen.

Le second vase a fourni un demi-kilogramme de vapeur à 100° $\frac{3}{4}$, *en* 22 *minutes et demie*.

Il résulte de ces expériences que la puissance calorifiante d'un feu de charbon bien allumé, sur lequel pose en entier le fond d'un vase, semble pouvoir être représentée par 216 degrés de l'échelle centigrade; puisqu'on a obtenu avec un bain d'huile, élevé à cette température, à très-peu près les mêmes effets qu'avec un feu de charbon tel que nous venons de le décrire; et ces effets ont été obtenus sur les mêmes quantités d'eau à la même hauteur dans chaque vase, et avec les mêmes orifices de sortie pour la vapeur.

Il y a lieu de croire qu'au moyen d'un vase d'une nature et d'une construction convenables, la durée de l'écoulement d'un poids déterminé de vapeur pourrait servir d'indications pyrométriques.

Ces expériences nous ont fait remarquer encore, d'abord, que les quantités de vapeur produites, dans une unité de temps,

avec un même feu, sont à très-peu près proportionnelles aux surfaces exposées à l'action du feu; nous voyons, en effet, qu'avec un fond d'une surface sous-double, on ne produit, à peu près dans le même temps, que la moitié du poids de vapeur.

Ensuite qu'il faut environ 6 fois autant de temps pour convertir un kilogramme d'eau bouillante en vapeur, que pour porter le même poids d'eau, de 10 degrés centigrades, à la température de l'ébullition.

CHAPITRE XLIV.

Dixième question. *Quelle influence peuvent exercer les tuyaux de conduite sur les dépenses de vapeur, et sur l'intensité de la force?*

D'après ce que nous avons dit sur les propriétés de la chaleur et de la vapeur, il est hors de doute que les tuyaux de conduite, suivant leur nature, leur longueur et leur diamètre, doivent affaiblir plus ou moins la température et par conséquent la tension de la vapeur qu'on fait écouler par ces tuyaux, ainsi que les quantités qui s'en écoulent sous forme élastique, et en un temps donné.

Mais quelle part peuvent avoir dans cet affaiblissement, et la nature des substances dont les tuyaux sont composés, et leurs longueurs, et leurs diamètres?

A quel point de décroissement de tension et de dépenses, par un orifice donné, peut-on arriver avec des tuyaux de diverses espèces?

Pour répondre à tous les cas que ces questions renferment, il faudrait de nombreuses expériences que nous n'avons pas été à même de faire : nous n'avons pu cependant nous dispenser de nous livrer à quelques recherches sur ce sujet; mais nous les avons resserrées dans celles qui ont rapport à l'influence des tuyaux de conduite en plomb, de trois différentes longueurs, et de deux diamètres différens.

Les tuyaux de plomb nous ont paru convenir à notre but, parce que ce métal est, comme on sait, moins bon conducteur que le cuivre ou le fer, dont on se sert assez ordinairement.

Ces tuyaux ont été soudés exactement, par une de leurs extrémités, à l'orifice de la chaudière dont nous nous sommes servis dans les expériences précédentes; et, par l'autre, à un vase de fer-blanc, dans lequel plongeait un thermomètre dont la marche s'accordait avec celui de la chaudière.

Les tuyaux étaient disposés de manière que la première vapeur qui se condensait pouvait retomber dans la chaudière.

Les tableaux suivans portent les résultats de ces expériences.

Première série d'expériences avec un tuyau de plomb de 12 mètres de longueur et de 9 millimètres de diamètre intérieur.

La température du lieu où se faisaient les expériences, était de 7 degrés centigrades au-dessus de 0.

La différence de température entre la chaudière et le vase de fer-blanc montre la perte de chaleur occasionée par le tuyau de conduite.

Chaque expérience a duré le temps nécessaire pour atteindre le but qu'on s'est proposé.

TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.	TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.
Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.
100	99 $\frac{1}{3}$	110	101 $\frac{2}{3}$
101	99 $\frac{1}{2}$	111	102
102	99 $\frac{3}{4}$	112	102 $\frac{1}{2}$
103	100	113	103
104	100 $\frac{1}{4}$	114	103 $\frac{2}{3}$
105	100 $\frac{1}{3}$	115	103 $\frac{3}{4}$
106	100 $\frac{2}{3}$	116	104 $\frac{1}{3}$
107	100 $\frac{3}{4}$	117	104 $\frac{2}{3}$
108	101 $\frac{1}{4}$	118	105
109	101 $\frac{1}{3}$		

Deuxième série d'expériences avec le tuyau précédent, mais on l'a couvert de lisières de drap sur toute sa longueur.

Température extérieure, 5 degrés au-dessus de o; à un mètre environ du tuyau, 9 degrés au-dessus de o.

TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc	TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.
Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.
100	99 1/5	110	101 2/3
101	99 2/5	111	102 1/4
102	99 3/4	112	102 2/3
103	99 4/5	113	103
104	100	114	103 1/3
105	100 1/5	115	103 4/5
106	100 2/5	116	104 1/5
107	100 3/5	117	104 2/5
108	101	118	105
109	101 1/4		

Troisième série d'expériences avec le tuyau précédent, couvert de lisières; mais il n'a plus que 8 mètres de longueur.

TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.	TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.
Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.
100	99 1/3	108	101 3/4
101	99 1/2	109	102 1/4
102	99 4/5	110	102 3/4
103	100	111	103
104	100 1/3	112	103 1/3
105	100 2/3	113	104
106	101	114	104 1/5
107	101 1/3	115	105

Quatrième série d'expériences avec le tuyau précédent ; même longueur de 8 mètres ; on a ôté les lisières.

TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.	TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.
Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.
100	99 $\frac{1}{5}$	109	101 $\frac{4}{5}$
101	99 $\frac{3}{5}$	110	102 $\frac{1}{4}$
102	99 $\frac{3}{4}$	111	102 $\frac{3}{5}$
103	100	112	103
104	100 $\frac{1}{4}$	113	103 $\frac{1}{2}$
105	100 $\frac{3}{5}$	114	104
106	100 $\frac{2}{3}$	115	104 $\frac{1}{2}$
107	101	116	105
108	101 $\frac{3}{5}$		

Cinquième série d'expériences avec le tuyau précédent ; il n'a plus que 4 mètres de longueur ; il n'est pas couvert de lisières.

TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.	TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.
Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.
100	99 $\frac{1}{5}$	107	102 $\frac{1}{2}$
101	99 $\frac{4}{5}$	108	103
102	100 $\frac{1}{4}$	109	103 $\frac{1}{3}$
103	100 $\frac{2}{5}$	110	104 $\frac{1}{5}$
104	101 $\frac{3}{5}$	111	105
106	102		

Sixième série d'expériences avec le tuyau précédent; même longueur de 4 mètres; il est couvert de lisières.

TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.	TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.
Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.
100	99 $\frac{3}{5}$	106	102
101	99 $\frac{5}{6}$	107	102 $\frac{2}{5}$
102	100 $\frac{1}{4}$	108	103
103	100 $\frac{2}{3}$	109	103 $\frac{2}{3}$
104	101 $\frac{1}{4}$	110	104 $\frac{1}{3}$
105	101 $\frac{1}{2}$	111	105

Septième série d'expériences avec le même tuyau de 4 mètres de longueur, sans lisières; on le mouille avec de l'eau froide, à 8 degrés, sur environ la moitié de sa longueur, et à plusieurs reprises.

TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.	OBSERVATIONS.
Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	
100	Point de vapeur.	Lorsqu'on passait l'éponge mouillée sur le tuyau, le courant de vapeur était subitement et un instant interrompu. Quelle qu'ait été la violence du feu, on n'a pu porter l'eau de la chaudière au-delà de 111 degrés.
101	99 $\frac{1}{8}$	
102	99 $\frac{1}{5}$	
103	99 $\frac{1}{2}$	
104	99 $\frac{3}{4}$	
105	100	
106	100 $\frac{1}{5}$	
107	101	
108	102	
109	103	
110	103	
111	103 $\frac{1}{8}$	

Huitième série d'expériences avec un tuyau de 20$^{\text{millim.}}$,23 de diamètre intérieur et de 4 mètres de longueur.

TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.	Le même tuyau ayant huit mètres de longueur. TEMPÉRATURE de la chaudière.	TEMPÉRATURE du vase de fer-blanc.
Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.	Degrés centigrades.
100	99 $\frac{1}{2}$	100	99 $\frac{1}{2}$
101	100 $\frac{2}{5}$	101	100 $\frac{1}{3}$
102	101 $\frac{1}{4}$	102	101 $\frac{1}{4}$
103	102 $\frac{1}{4}$	103	102
104	103 $\frac{1}{2}$	104	103
105	104 $\frac{1}{3}$	105	104
106	105	106	105

On n'a pu porter la température de la chaudière au-delà de 106 degrés centigrades, qu'elle qu'ait été la violence du feu.

Neuvième et dernière série d'expériences, avec le tuyau précédent, de 4 mètres de longueur. On a mouillé constamment avec de l'eau froide la moitié de la longueur du tuyau.

On n'a pu, avec le feu le plus vif, porter la température de la chaudière au-dessus de 100 degrés centigrades, et la température du vase de fer-blanc est restée constamment à 99° $\frac{1}{2}$.

Ces diverses séries d'expériences donnent lieu aux remarques suivantes :

1°. Il ne paraît pas que la nature de la substance dont les tuyaux de conduite sont composés, ait une influence très-sensible sur la perte de chaleur que peut éprouver un courant de vapeur, du moins dans les limites de longueur que nous avons employées pour nos tuyaux.

On voit en effet qu'avec le tuyau de plomb à découvert, ou

couvert de lisières de drap, ce qui le rend beaucoup moins conducteur, les rapports de température entre la chaudière et le vase de fer-blanc n'ont pas très-sensiblement varié dans les deux cas : la vitesse avec laquelle la vapeur parcourt *la conduite* qu'on lui donne, semblerait expliquer ce phénomène.

2°. La longueur de la conduite a exercé une influence marquée sur la perte de chaleur, lorsque la température de la vapeur était au-delà de 105 degrés centigrades et que le tuyau n'avait que 9 millimètres de diamètre : la longueur étant de 12 mètres, il fallait que la vapeur eût 118 degrés dans la chaudière, pour marquer 105 degrés dans le vase de fer-blanc ; avec une longueur de 8 mètres, il ne fallait que 115 degrés dans la chaudière pour obtenir les 105 degrés dans le vase; et avec le tuyau de 4 mètres, il n'en fallait que 111.

Cependant la longueur de la conduite, avec le tuyau de 20 millimètres, 23 de diamètre, n'a pas paru influer sur la perte de chaleur, dans les limites de nos expériences : la différence de température a été la même dans la chaudière et dans le vase, avec une longueur de 4 mètres et une de 8 mètres. Ce fait trouvera peut-être son explication dans la remarque qui va suivre.

3°. Enfin, lorsque le diamètre de la conduite est très-petit, eu égard à la quantité de vapeur qui doit y passer, en un temps donné, la perte de chaleur est considérable, comme on le voit en comparant les expériences faites avec le tuyau de 9 millimètres de diamètre et celles qu'on a faites avec le tuyau de 20 millim., 23 de diamètre; il paraît donc évident que la vapeur, forcée de se replier sur elle-même dans une conduite étroite, communique plus de chaleur aux parois, et d'autant plus que celles-ci ont plus de longueur.

Le peu de perte de chaleur que le plus large tuyau a offert dans l'avant-dernière série d'expériences, semble montrer que

l'aire de l'orifice d'une conduite doit être avec la surface de l'eau exposée au feu, à peu près dans le rapport de 1 à 1000, lorsqu'on n'a pas besoin, bien entendu, de pousser la température du courant continu de vapeur au-delà de 106 degrés centigrades.

CHAPITRE XLV.

Résumé des principaux faits relatifs à la vapeur.

1°. Il faut nécessairement la réunion de deux élémens pour composer le moteur qui nous occupe ; ces élémens sont le *calorique* et *l'eau*. La vapeur, qui est le résultat de cette combinaison, peut être considérée comme contenant toujours, *sous le même poids*, les mêmes proportions de calorique et de molécules d'eau ; de sorte qu'un gramme de vapeur, marquant o degré de température, admet dans sa composition autant de chaleur et de molécules d'eau, qu'un gramme de vapeur marquant 200 degrés ; il a donc fallu dépenser autant d'eau et de chaleur pour former ce poids de vapeur à o degré, que pour produire ce même poids à 200 degrés. Toutefois les mêmes circonstances n'ont pas accompagné la production de ces deux espèces de vapeur ; elles présenteraient, de tous points, les mêmes caractères extérieurs, puisqu'elles ont la même essence, et quant à la nature des principes constituans, et quant aux proportions de ces principes.

Pour former le volume d'un gramme pesant de vapeur à o degrés, il a fallu que, dans l'espace où elle s'est répandue, il ne

régnât, pendant toute la durée de sa formation, qu'une tension très-faible et correspondante à sa propre tension; il a fallu qu'aucune pression étrangère et supérieure à cette force ne vînt s'opposer au développement du volume que doit prendre un gramme de vapeur à o degré.

Pour le gramme de vapeur à 200 degrés, l'espace qui le renferme a pu présenter au développement de la vapeur une pression étrangère considérable et aussi grande que la force même de la vapeur à cette température; mais il en est résulté que cette vapeur a été forcée de se replier sur elle-même par les effets simultanés et de la pression étrangère et de la forte tension qui lui est donnée par le feu qui la produit.

Ainsi donc le gramme de vapeur, à o degré, occupe un très-grand volume, et le gramme de vapeur à 200 degrés un très-petit relativement.

Que si l'on comprimait ce grand volume de vapeur à o degré, sans qu'il y eût perte de chaleur, et jusqu'à le réduire aux dimensions de celui que présente la vapeur à 200 degrés, la première espèce de vapeur marquerait aussi 200 degrés, et serait identique avec l'autre; et si, au contraire, on laissait développer le volume de la vapeur à 200 degrés au point de le rendre égal au volume d'un gramme de vapeur à o, les 200 degrés de cette vapeur disparaîtraient sous forme latente, et on aurait un gramme de vapeur à o.

2°. La vapeur occupe l'espace qui la renferme, de deux manières: ou bien elle le remplit tellement qu'on ne peut plus en ajouter, à moins d'augmenter la température de l'eau qui l'a fournie, et dans ce cas l'on dit qu'elle *sature l'espace;* ou bien elle ne sature pas l'espace qui la contient, et c'est ce qui peut arriver en deux circonstances différentes: 1°. lorsqu'on élève la température d'un volume de vapeur toute formée; 2°. lorsque,

fermant toute communication avec la source productrice de la vapeur, on agrandit tout à coup la capacité du vase dans lequel on a recueilli cette vapeur.

3°. Tout le calorique qui entre comme principe constituant dans la composition de la vapeur, ne se manifeste pas aux instrumens employés pour en mesurer la quantité absolue. Si la vapeur est comprimée sur elle-même, sans condensation aucune, elle montre d'autant plus de chaleur sensible, que la compression est plus forte; si elle peut se raréfier, sans obstacle, elle semble se refroidir, parce qu'une portion de chaleur, qui affectait nos instrumens, devient latente, ce qui veut dire qu'elle ne les affecte plus.

4°. On estime qu'il y a *à peu près* 6 *fois* autant de chaleur dans un poids donné de vapeur à 100 degrés centigrades, sous la pression moyenne de l'atmosphère, que dans le même poids d'eau à l'état d'ébullition. Donc un kilogramme de vapeur à 100 degrés mêlé avec 5 kilogrammes d'eau à 0 de température produira 6 kilogrammes d'eau bouillante.

5°. La vapeur se forme dans un récipient plein d'air comme dans le vide; il paraît qu'elle trouve dans l'écartement des molécules du fluide, la place nécessaire pour s'y loger.

6°. On change *l'état* de la vapeur par deux moyens : ou par compression, ou en la mettant en contact avec un corps d'une température plus basse. Par le premier, un volume de vapeur *pure* peut repasser entièrement à l'état liquide; si elle était mêlée avec de l'air, une portion de cette vapeur conserverait son *état* dans le mélange, quelle que soit la force comprimante. Par le second, une portion seulement de la vapeur repasse à l'état liquide; et cette portion, *en poids*, est d'autant plus grande que le corps en contact est plus froid et que dans le contact elle a moins de mouvement. La portion qui reste,

même dans les basses températures, peut conserver le volume primitif.

7°. Le *poids* d'un volume donné de vapeur, *saturant l'espace*, est d'autant plus faible que la température de l'eau qui l'a produite est plus basse, et d'autant plus fort que cette température est plus élevée : environ 1700 décimètres cubes de vapeur à 100 degrés centigrades, sous la pression moyenne de l'atmosphère, pèsent un kilogramme; donc un kilogramme d'eau entretenue bouillante fournit, en nombre rond, 1700 décimètres cubes de vapeur à 100 degrés.

8°. La densité de la vapeur est sensiblement proportionnelle à sa tension ou à sa force; et à partir du terme de l'ébullition, 22 degrés centigrades d'addition à un degré de température déterminé semblent suffire pour doubler la densité de la vapeur formée à ce degré déterminé de température : ainsi à 122 degrés environ, 1700 décimètres cubes de vapeur pèsent 2 kilogrammes; à 144 degrés, 4 kilogrammes; à 166 degrés, 8 kilogrammes, etc., etc.

A 122 degrés un kilogramme d'eau ne fournit, *à saturation d'espace*, qu'environ 850 décimètres cubes de vapeur; à 144 degrés, que 425 décimètres cubes, etc., etc.

9°. La force de la vapeur, à 100 degrés centigrades, soutient une colonne de mercure de 76 à 77 centimètres de hauteur, ce qui équivaut à la pression moyenne de l'atmosphère.

Cette force peut augmenter, ou par l'action seule de la chaleur, ou par l'action combinée de la chaleur et de l'eau, ou même enfin par le seul concours de l'eau ou de la vapeur dans certaines circonstances.

Par la seule action de la chaleur : chaque degré de température que prend de la vapeur à 0 degré, augmente sa force de 0,00375, et par conséquent, de 0 degré à 100 degrés, de 0,375.

Par l'action combinée de la chaleur et de l'eau : lorsque la vapeur se compose des proportions naturelles de ses élémens, en un mot, lorsqu'elle se produit, saturant l'espace, sa force augmente, à partir de 100 degrés, à peu près dans le rapport de 1 à 1,032 *pour chaque degré* de température; ce qui montre la grande part qu'a l'eau dans l'accroissement de tension de la vapeur : avec un seul degré de température de plus, elle produit à peu près autant que la chaleur seule sur de la vapeur *pure* avec 100 degrés, en la prenant de 0 à 100 degrés.

Enfin *par le seul concours de l'eau sous de la vapeur dans certaines circonstances :* lorsqu'on introduirait de nouvelle eau dans la vapeur échauffée au delà de saturation d'espace, l'eau s'emparerait du calorique en excès et se réduirait en vapeur.

Ainsi, par exemple, s'il est permis d'étendre jusqu'à 122 degrés centigrades et sur la vapeur la loi des gaz dilatés par la chaleur, celle-ci seule augmenterait la force de la vapeur de 0,0825 depuis 100 degrés jusqu'à 122 degrés; tandis que par le concours de l'eau avec de la vapeur, jusqu'à saturation d'espace à 122 degrés, la force serait doublée.

10°. La force de la vapeur est affaiblie par deux causes : 1°. par la perte d'une portion de sa chaleur, que ce soit par compression, ou par le contact d'un corps froid qui s'en empare, 2°. par la raréfaction qu'on peut lui faire subir.

Dans le premier cas, le décroissement de force est non-seulement proportionnel à la quantité d'eau qui se sépare de la vapeur, mais encore au degré de raréfaction qu'elle éprouve après la condensation, toutefois lorsque cet effet a lieu par le contact d'un corps froid. Le décroissement est simplement proportionnel à la quantité d'eau séparée, lorsque la condensation a lieu par compression, et qu'on rend à la vapeur son volume primitif et sa chaleur.

Dans le second cas, le décroissement de force est proportionnel à l'agrandissement de volume que la vapeur subit par la raréfaction. Le décroissement est moindre, lorsqu'on maintient la vapeur au degré de température qui l'affectait, avant la raréfaction; et il n'y aurait point de décroissement de force, si dans cette dernière circonstance le récipient à vapeur contenait de l'eau qui, venant à se vaporiser et par la diminution de tension, et par l'accumulation de la chaleur, saturerait l'espace au fur et à mesure qu'on l'agrandirait.

11°. Un volume donné de vapeur, formée sous une pression quelconque, est comme un ressort tendu, qui se détend à mesure que la force comprimante décroît; on dit alors qu'elle est *en expansion*.

12°. La vapeur a un *maximum* de force pour chaque degré de température; ce *maximum* n'existe que lorsque l'espace est saturé; ainsi la force d'expansion est toujours moindre que la tension qui règne dans un espace saturé, attendu qu'il n'y a d'expansion qu'autant que la vapeur peut s'étendre au delà de l'espace saturé, avant la détente.

13°. Un mélange de vapeur et d'air a une tension égale à la somme des tensions respectives et de la vapeur et de l'air, correspondantes au degré de température du mélange.

14°. Trois à quatre kilogrammes de bonne houille peuvent produirent à peu près 28 kilogrammes de vapeur; il faudrait à peu près le double de bois de chêne pour donner les mêmes résultats, on suppose qu'il n'y a point de perte sensible de chaleur.

15°. La quantité de vapeur produite en un temps et avec un foyer donnés est proportionnelle à la surface d'eau exposée au feu; et l'on peut admettre, en pratique, que 2 mètres carrés,5 de surface d'eau en contact avec les parois d'une chaudière, *exposée*

à l'action d'un feu ordinaire, produiront, par heure, environ 28 kilogrammes de vapeur.

16°. Il faut environ 6 fois autant de temps pour réduire un poids donné d'eau en vapeur, que pour porter le même poids de 10 à 100 degrés, terme de l'ébullition, avec le même appareil.

17°. La quantité de chaleur qui pénètre, en un temps donné, du foyer calorifiant dans la chaudière et la masse d'eau qu'elle renferme, est d'autant plus grande qu'il y a plus de différence entre la température de cette masse d'eau et celle de l'espace que la chaudière occupe dans le fourneau. S'il y avait égalité de température, l'action de la puissance calorifiante sur la masse d'eau deviendrait nulle. Une chaudière est d'autant plus éloignée d'arriver à cette égalité, qu'elle présente plus d'espace à la vapeur pour se développer.

18°. La tension de la vapeur, renfermée dans une chaudière, exposée à l'action du feu, suivant l'usage ordinaire, ne croîtrait pas indéfiniment : au delà d'une certaine température, le rayonnement du calorique par la chaudière suffirait seul pour dissiper la quantité de chaleur qu'elle recevrait dans un temps donné. L'espace occupé par une chaudière dans un fourneau ordinaire paraît renfermer une puissance calorifiante d'environ 216 degrés centigrades ; et cette température serait peut-être le terme auquel s'arrêterait, dans des circonstances communes, l'eau d'une chaudière : elle perdrait par émission ce qu'elle recevrait, dans le même temps, par absorption.

19°. avec une *puissance calorifiante* donnée, la température, et par conséquent la tension que la vapeur peut prendre, dépend de la grandeur de l'orifice par lequel elle peut sortir de la chaudière.

20°. Il y a pour chaque degré de température une limite de

grandeur d'orifice, eu égard à la surface de l'eau exposée au feu, en *dedans* de laquelle limite on ne peut pas augmenter la température de la vapeur qui sort en courant continu, quelle que soit la violence du feu auquel la chaudière est exposée.

21°. Lorsque l'aire de l'orifice de sortie est plus grande que la *millième partie* de la surface de l'eau exposée au feu, on ne peut guère élever la température de la vapeur sortant d'une chaudière par un courant continu, sans tuyau de conduite, au delà de 100 degrés centigrades, quelle que soit la grandeur du feu.

22°. Avec une puissance calorifiante donnée, le *poids* de vapeur qui sort d'une chaudière en un certain temps et en *courant continu est toujours égal, quelle que soit l'aire de l'orifice de sortie;* parce que la densité et la vitesse de la vapeur croissent en raison inverse de l'aire de l'orifice par lequel elle s'échappe.

23°. La nature des substances dont on peut composer les tuyaux de conduite à vapeur, paraît influer peu sur la perte de chaleur que ce fluide éprouve dans son passage rapide.

24°. La longueur des tuyaux de conduite n'occasione une perte considérable de chaleur que lorsque l'aire des orifices est très-petite, eu égard à la surface de l'eau exposée à un feu vif et soutenu. Lorsque cette aire est dans le rapport de 1 à 1000, la longueur des tuyaux a une très-petite influence sur la perte de calorique que pourrait essuyer un courant de vapeur, dont la température ne dépasserait point 100 degrés centigrades.

25°. Enfin la longueur d'un tuyau de conduite d'un certain diamètre fait le même effet pour favoriser l'élévation de température de la vapeur dans la chaudière, que la diminution de l'orifice, placé immédiatement sur la chaudière : ainsi, on n'élèvera pas, sans tuyau de conduite, la température de l'eau

au-dessus de 100 degrés avec un orifice dont l'aire serait environ la millième partie de la surface de l'eau exposée au feu; tandis qu'avec un tuyau dont l'orifice aurait la même surface, et une longueur de 6 à 8 mètres, la température de la chaudière pourrait s'élever, avec le même feu, au delà de 100 degrés.

CHAPITRE XLVI.

Deuxième série de questions relatives aux détails d'appareils et aux moyens mécaniques employés pour tirer parti de la vapeur comme force motrice.

Nous avons étudié les propriétés de la vapeur dans les chapitres précédens; nous avons tâché de présenter ce corps sous toutes ses faces, dans toutes les circonstances qui pouvaient nous amener à reconnaître le rôle qu'il joue comme moteur, et même à prévoir les ressources qu'il peut offrir à des combinaisons nouvelles; nous avons maintenant à examiner non-seulement les relations de chaque propriété fondamentale de la vapeur, avec les moyens mécaniques qu'on peut employer pour en tirer le parti le plus avantageux; mais encore comment on est parvenu à mettre en valeur, si l'on peut parler ainsi, ces diverses propriétés, et quelles solutions particulières on a trouvées jusqu'à présent à des problèmes qu'on peut assurément résoudre de toutes sortes de manières différentes.

N'oublions pas que ce qui nous importe le plus ici n'est pas de détailler minutieusement ce qui *s'est fait* pour résoudre les diverses questions que présente l'emploi de la vapeur comme

force motrice, mais d'établir avec soin toutes les conditions que ces questions doivent renfermer; de les poser clairement et de manière à guider l'esprit d'amélioration, en l'affranchissant de cette espèce d'entraves qu'il rencontre inévitablement en suivant, non les principes d'après lesquels on a conçu et exécuté des combinaisons mécaniques, mais seulement les détails et les formes mêmes adoptées dans l'exécution.

Première question. *Quelles sont en général les dispositions les plus convenables à donner aux fourneaux et aux chaudières pour produire de la vapeur?*

En général, les formes à donner à un fourneau à vapeur dépendent de celles de la chaudière même qu'il doit porter; mais, quel qu'il soit, il faut toujours que l'air extérieur arrive, par un côté, en suffisante quantité pour animer la combustion dans le foyer, et que, par un autre côté, les produits de la combustion, avec l'air qui a servi, puissent s'échapper sans aucun obstacle.

Si l'air, qui est l'agent indispensable de la combustion, ne peut arriver en assez grande quantité et dans le temps convenable, parce que les passages qu'on lui a ouverts sont trop resserrés, relativement à ce que peut exiger la masse de combustible enflammé, la combustion languit, et une portion des matières inflammables s'échappent sans brûler, et par conséquent en pure perte.

Que si les passages ouverts aux produits de la combustion, ou, si l'on veut, à la fumée, ne permettaient pas à ceux-ci de s'échapper avec autant de promptitude qu'ils se forment, la combustion languirait aussi.

Pour concevoir clairement comment les choses se passent dans un fourneau, supposons que dans le coude d'un tuyau recourbé de façon que les deux branches soient parallèles et égales,

on ait placé du combustible enflammé, en tenant les branches verticalement, leurs orifices en haut : l'air renfermé dans les deux branches d'égale hauteur est incontinent dilaté, et l'air extérieur tend à rétablir l'équilibre ; mais comme il agit de la même manière sur l'une et l'autre branches, il n'y a pas de raison pour que l'une devienne spécialement un passage affecté à la réception de l'air qui doit entretnir la combustion, plutôt que l'autre qui se trouve dans les mêmes conditions par rapport à la pression de l'atmosphère ; il en est de même pour ce qui concerne le passage qui doit s'offrir à la fumée. Or, dans ce conflit de deux actions, de deux forces égales, et l'air n'arrivant pas par un bout pour sortir par l'autre, le combustible introduit tout allumé, s'éteindra bientôt de lui-même.

Dans cette supposition, il n'est qu'un seul moyen d'animer et d'entrenir la combustion, c'est de faire entrer de l'air, à l'aide d'une force étrangère par l'une des branches du tuyau ; cet air alors sera forcé de traverser la masse du combustible renfermé dans le coude, et chassera devant lui le produit de la combustion, par l'autre branche du tuyau ; les conditions fondamentales de l'activité d'un fourneau sont ainsi remplies ; mais elles le sont par le concours d'une force étrangère.

Voulez-vous qu'elles le soient sans ce concours? Coupez l'une des branches du tuyau, à la naissance du coude, et de telle manière que le combustible soit, de ce côté, le plus près possible de l'air extérieur ; celui-ci pénétrera alors constamment par l'orifice de la branche coupée, et la fumée pourra sortir, sans interruption, par l'autre branche qui a conservé sa longueur primitive. Voici pourquoi : du côté de la courte branche, le combustible enflammé, se trouvant en contact immédiat avec l'air libre extérieur, l'attire pour se combiner avec lui ; la colonne d'air se précipite toute entière pour remplacer

la couche attirée, et disperse au dehors la fumée qui peut être produite de ce côté, dans le premier instant; un courant d'air commence donc à s'y établir. De l'autre côté, dans la grande branche, la couche inférieure de la petite colonne d'air, qui est renfermée dans le tuyau, est bien attirée aussi; mais toute cette colonne est en même temps dilatée par la chaleur et par la fumée qui ne peut pas se disperser et qui tend à s'élever; il résulte de la diversité des deux effets respectifs, produits sur les orifices des deux branches, que d'un côté, l'air extérieur afflue sans être dilaté et avec toute sa densité, et que, de l'autre, la petite colonne d'air qui touche immédiatement le combustible, étant dilatée, ne fait plus équilibre à la première et cède au courant qui s'établit par la branche coupée des tuyaux.

On obtiendrait à peu près le même effet sans couper cette branche; il pourrait suffire de la courber de telle façon, qu'elle fût dans un plan horizontal, tandis que l'autre resterait verticale : car l'air dilaté, tendant toujours à s'élever, ainsi que la fumée, passeraient de préférence par le tuyau vertical.

Par la même raison, les deux branches, bien qu'élevées verticalement et parallèlement, serviraient toutes deux de passage à la fumée, si au bas du coude on faisait une simple ouverture, ou si l'on appliquait à cette ouverture un tuyau descendant qui puiserait l'air d'en bas.

Pour que le combustible brûle dans un fourneau, il faut donc absolument que d'un côté de la masse comburante il y ait affluence d'air frais, et de l'autre, une colonne d'air qui, à raison de sa dilatation par la chaleur, ne soit plus en équilibre avec l'air affluent; et plus il y aura d'inégalité dans les pressions respectives qui ont lieu sur les deux côtés différens de la masse en combustion, plus la combustion est vive et animée; on dit alors vulgairement que le fourneau a beaucoup de *tirage*.

Mais, pour obtenir cette inégalité de pression, il faut nécessairement perdre de la chaleur, et cette perte est inévitable dans les fourneaux abandonnés à l'action naturelle de l'air sur leurs foyers.

On appelle ordinairement *cendrier* l'orifice par lequel l'air frais se précipite sur le combustible enflammé ; et *cheminée*, celui par lequel s'échappent les produits de la combustion.

Pour obtenir, en général, une combustion vive et complète de tout ce qu'il y a d'inflammable dans un combustible quelconque, il faut éviter, 1°. d'accumuler du combustible en trop grande quantité, eu égard aux dimensions des diverses parties du fourneau; 2°. d'établir une trop grande inégalité dans les ouvertures destinées, l'une à l'affluence de l'air extérieur dans le foyer, et l'autre à l'évacuation de la fumée; 3°. de se servir d'une cheminée trop basse et trop large.

Une masse de combustible donnée exige pour brûler complétement une certaine quantité d'air; il peut se faire que cette masse soit si grande, et la quantité d'air affluente si petite, à raison de quelque mauvaise disposition du cendrier, que la combustion soit étouffée dès le commencement; il peut se faire encore que le rapport entre la masse du combustible et la quantité d'air affluente, sans être comme nous venons de le supposer, soit cependant tel que la combustion soit languissante ou incomplète; alors une partie des principes inflammables du combustible subit une sorte de distillation, et se dissipe en fumée sans brûler; quand on se sert de houille, cette fumée sort toute noire de la cheminée.

La combustion languit et se fait incomplétement, non-seulement lorsqu'on lui fournit trop peu d'air, mais encore lorsque le combustible est trop entassé dans le foyer, ou qu'il est disposé de manière que l'air ne puisse en traverser toute la

masse et en aborder tous les points. De sorte que ce n'est jamais en diminuant simplement l'affluence de l'air qu'il faut graduer la chaleur du foyer dans le cours ordinaire du service du fourneau; car alors la combustion étant incomplète, on perd, avec la fumée, des principes inflammables qui n'ont point brûlé; ce doit être principalement en diminuant la masse du combustible, dont il faut toujours entretenir l'inflammation aussi vive et aussi animée qu'elle peut l'être; et si l'on veut momentanément modérer ce feu, le moyen le plus efficace est d'ouvrir la porte du foyer, et d'y laisser passer, au-dessous du combustible, un courant d'air froid. Si l'on veut ralentir davantage encore l'action du feu, il faut en outre fermer la porte du cendrier. Il est superflu de dire qu'on l'étouffe tout-à-fait en fermant la porte du cendrier, du foyer et l'orifice de la cheminée.

C'est de la manière d'entretenir le feu que dépend principalement la régularité de son action; elle contribue aussi beaucoup à l'économie de combustible : si vous attendez trop long-temps avant de remplacer la portion de combustible qui est consommée, l'action du feu s'est affaiblie; et pour conserver la même masse de combustible dans le foyer, vous êtes obligé d'en mettre trop à la fois, ce qui peut occasioner une perte réelle de principes inflammables, qui s'échappent sans brûler par la cheminée; d'ailleurs vous n'obtenez jamais ainsi un feu régulier. Mais si, pour éviter cet inconvénient, vous rechargez trop souvent, il arrive qu'outre la fatigue du service, le courant d'air froid qui se précipite par la porte du foyer au-dessus du combustible, altère aussi la puissance calorifiante du fourneau; vous êtes donc placé entre deux inconvéniens qu'il est peut-être impossible d'éviter entièrement dans le mode ordinaire d'entretenir le feu.

La perfection consisterait à remplacer immédiatement, à chaque instant, le combustible brûlé, par une quantité égale de combustible frais, et par conséquent par petites portions à la fois. La masse du foyer comburant resterait ainsi la même, et les charges successives, si petites en comparaison de cette masse, seraient incontinent en combustion complète; et rien d'inflammable ne se perdrait si toutes les autres dispositions du fourneau étaient convenables.

Mais pour cela il faudrait pouvoir recharger le feu, sans avoir besoin d'ouvrir à tout instant la porte du foyer : c'est dans la vue d'atteindre à cette perfection qu'on a tenté, à diverses époques, de charger le feu d'abord par le moyen d'une trémie placée au-dessus du foyer, ou par quelque équivalent; on la remplissait de combustible qui descendait dans le foyer par son propre poids et successivement. Ce mode était trop incertain dans ses effets pour remplir l'objet proposé; il offrait en outre l'inconvénient grave d'exposer la réserve de combustible à prendre feu.

On a ensuite, et dans les derniers temps, imaginé d'adapter à une trémie de cette espèce, un mécanisme mis en mouvement par une force extérieure, destinée à faire tomber de cette trémie des petites portions égales de combustible qu'on règle d'après celles qui se consomment à chaque instant. De cette manière le feu est régulièrement entretenu, sans avoir besoin d'ouvrir la porte du foyer, si ce n'est pour commencer le feu. On conçoit qu'il y a bien des manières différentes de produire cet effet, et toutes fort faciles à imaginer, suivant les dispositions particulières du fourneau.

Nous en avons donné une dans l'atlas, sous le titre de *grille tournante*. On a eu pour but ici de faire varier à chaque instant le point de la grille sur laquelle on projette du com-

bustible frais; on évite ainsi l'inconvénient qu'il y aurait à accumuler sur le même point trop de combustible, et à ne pas étendre assez les dimensions du foyer comburant. Avec une grille fixe, il faudrait non-seulement faire tomber le combustible de la trémie, mais encore le projeter avec un peu de force pour l'étendre sur toute la surface de la grille.

Ce nouveau mode d'entretenir le feu de charbon-de-terre a des avantages incontestables sur l'ancien, et d'autant plus que le combustible est projeté *dans un plus grand état de division.* Nous avons quelques raisons de croire que par ce mode il y a un quart d'économie réelle, sans compter une régularité de feu qu'on ne peut obtenir avec le mode ordinaire.

Il faut dire toutefois que ce mode perdrait de ses avantages comme l'autre, si le tirage se faisait mal; la cheminée doit avoir assez de hauteur pour établir une inégalité de pression suffisante entre la colonne d'air qui correspond à l'orifice supérieur de la cheminée et celle qui correspond à l'ouverture par laquelle l'air vient animer la combustion. On conçoit aisément que plus la cheminée est haute, plus la couche d'air à laquelle elle aboutit diffère de densité avec la couche qui correspond au cendrier; à quoi il faut ajouter aussi le degré de dilatation et de légèreté qui affecte la colonne d'air renfermée dans l'intérieur de la cheminée, ainsi que les produits de la combustion qui s'y élèvent avec plus ou moins de rapidité, suivant la hauteur de la cheminée.

Brûler tout le combustible qu'on introduit dans un foyer, sans perdre en fumée des principes inflammables; entretenir le feu avec régularité, établir un tirage tel que l'air ne manque jamais à la combustion et que la fumée s'échappe aussitôt qu'elle est formée, dans un état absolu d'incombustibilité, comme nous l'avons déjà dit; voilà donc les premières conditions fondamentales d'un bon fourneau.

Mais pour remplir ces conditions, quelles doivent être précisément, pour une chaudière à vapeur déterminée, les dispositions et les dimensions respectives des diverses parties dont le fourneau est ordinairement composé? Nous croyons qu'on manque des données nécessaires pour répondre d'une manière décisive, absolue : il faudrait avoir déterminé avec exactitude, 1°. la quantité d'air qu'exigerait un poids donné de chaque espèce de combustible pour brûler complétement dans un temps déterminé ; 2°. les volumes des produits de la combustion formés dans ce temps ; 3°. le *minimum* de chaleur qu'il faut consentir à perdre pour rompre l'équilibre entre deux colonnes d'air, afin d'obtenir le tirage nécessaire. On n'a sur ces divers points que des notions vagues ; et la construction des fourneaux, sous le point de vue du moins de la question ci-dessus, est en général abandonnée à la routine, ou conduite, mais assez rarement, d'après quelques règles qu'a fournies l'observation de ce qui a le mieux réussi.

Au reste, voici ce qu'on voit ordinairement pratiquer dans les constructions qui passent pour bonnes.

Chaudière carrée de 2 à 3 mètres de côté, ou l'équivalent par une autre forme.

Foyer, 37 à 40 centimètres de largeur sur 10 à 12 décimètres de longueur.

Cendrier, en carré, ouverture de 30 à 32 centimètres de côté ; longueur 10 à 12 décimètres.

Chauffe ; hauteur depuis la grille jusqu'au fond de la chaudière, 60 à 65 centimètres.

Conduits autour de la chaudière ; 16 à 18 centimètres de largeur sur 65 à 70 centimètres de hauteur au *maximum* ; si la chaudière était fort haute, on ferait faire deux tours aux con-

duits, dont, en aucun cas, la largeur ne doit être au-dessus de 80 centimètres.

Cheminée; ouverture intérieure, en carré, 27 à 30 centimètres de côté à sa partie inférieure, et 21 à 22 centimètres à sa partie supérieure. Le *minimum* d'ouverture est de 15 à 16 centimètres de côté.

Distance entre les barreaux de la grille qui porte le combustible; depuis 9 millimètres jusqu'à 50, suivant la nature du combustible.

Fond de chaudière; on le fait ordinairement concave, et cette concavité est de 30 à 35 centimètres.

Lorsqu'on arrête des dimensions pour le foyer et la chaudière d'un appareil à vapeur, il est une considération à laquelle il semble qu'on n'a point eu égard jusqu'à présent, et qui, selon nous, est commandée et par la prudence et par l'économie de combustible; nous l'avons déjà signalée plus haut, c'est le moment d'y revenir.

On donne ordinairement au foyer d'une chaudière à vapeur des dimensions telles que si l'on faisait autant de feu que la grandeur de ce foyer le permet, on pourrait élever la température à un point qui présenterait les plus grands dangers. Cependant on n'a jamais le projet d'aller jusque-là, et même l'on n'a pas besoin d'une vapeur à ce haut degré de tension, pour le service auquel on la destine. Ainsi donc voilà une construction qui n'est pas appropriée à l'usage qu'on en veut faire, et un excès de dimensions qui ne peut avoir d'utilité sous aucun rapport, et qui présente beaucoup de dangers. En effet, qu'arrive-t-il? Le chauffeur, pour modérer le feu et éviter quelqu'accident, est obligé de mettre une petite quantité relative de combustible, dans un grand espace; or la chaleur du foyer perd de sa puissance en se disséminant ainsi dans cet espace plus grand qu'il

ne doit l'être; d'ailleurs, comme il lui est facile de faire plus de feu, et difficile de reconnaître s'il est juste au point convenable, il est fort sujet à produire plus de vapeur qu'il n'en faut, et qu'il faut perdre; voilà d'abord pour ce qui concerne l'économie de combustible; voici pour ce qui regarde la prudence : en laissant à l'inexpérience ou à l'incurie du chauffeur la possibilité de charger le fourneau et de pousser par conséquent sa puissance calorifiante au delà des bornes, vous êtes chaque jour exposé aux dangers d'une violente explosion.

Pour satisfaire donc à ce que prescrit l'économie et la prudence, nous voudrions que toujours le foyer fût construit de telle façon et que la chaudière eût de telles dimensions par rapport à ce foyer, que, pour obtenir le *maximum* de force de vapeur qu'on se propose d'employer, il fallût faire constamment le feu le plus actif que le foyer pût comporter.

Il résulterait nécessairement de ce système de construction plus d'économie et de régularité, et incomparablement plus de sécurité qu'avec tout autre : plus d'économie et de régularité, attendu que, comme il est extrêmement aisé de reconnaître si le feu est aussi actif et le fourneau aussi chargé qu'ils puissent l'être, le chauffeur pourra faire son service sans hésitation; c'est un point fixe qu'il doit atteindre, sous peine d'arrêter l'activité de la force et de signaler ainsi lui-même sa négligence. Il ne peut pas faire trop de feu et consommer inutilement du combustible, puisque le foyer ne le comporterait pas. Plus de sécurité, parce qu'on établirait la chaudière avec plus de solidité qu'il n'en faudrait pour résister invinciblement à la tension la plus haute, à laquelle la vapeur puisse parvenir, quels que soient le feu et les étourderies du chauffeur.

Mais il s'agirait de savoir maintenant quelles seraient les dimensions à donner au foyer, par rapport à celles de la chau-

dière, pour obtenir ces résultats. Ce que nous avons rapporté plus haut, au sujet de ces dimensions, est de pratique ordinaire, et non la désignation de ce qu'il y aurait à faire, dans le système qui nous semble devoir être adopté. Il nous manque pour cela bien des données expérimentales; c'est une route nouvelle dans laquelle nous avons peut-être fait les premiers pas, par le point de vue sous lequel nous avons envisagé nos recherches sur la sortie de la vapeur par divers orifices, à différens degrés de température.

En attendant donc que, plus avancé sur ce point important, on puisse, à l'aide d'un grand nombre d'observations, fixer d'une manière positive quelle grandeur de foyer convient à une chaudière de telles dimensions, pour que le feu le plus actif qu'on puisse faire dans le foyer ne porte jamais la vapeur qu'à un degré de tension déterminé, et n'en fournisse que les quantités nécessaires au travail le plus actif qu'on veuille faire, il est possible du moins, d'après nos recherches précédentes, d'indiquer comment on parviendrait à reconnaître la portée, et, s'il est permis de le dire, le *caractère* d'un appareil à vapeur construit dans des dimensions quelconques, et comment nous croyons qu'il serait facile de le rapprocher du système nouveau dont nous venons de parler.

Pour apprécier ce qu'on doit attendre d'un appareil tout monté, il faudrait d'abord s'assurer qu'une des ouvertures pratiquées sur la chaudière est plus grande que la *millième partie* de la surface de l'eau en contact avec les parois de la chaudière; si la plus grande, qu'on appelle *le trou d'homme*, ne suffisait pas, il faudrait ouvrir toutes les tubulures et arriver à cette grandeur d'orifice. On ferait alors sous la chaudière un feu qu'on augmenterait graduellement, jusqu'à ce qu'il fût aussi fort et aussi actif que le fourneau peut le comporter. La température

ne s'élèverait pas sensiblement au-dessus de 100 degrés centigrades ; on mesurerait les quantités de vapeur produites dans l'unité de temps, par les règles que nous avons établies plus haut, et l'on jugerait si cette production avec le feu le plus fort est *en deçà, à l'égal* ou *au delà* du *maximum* de consommation qu'on peut faire de la vapeur pour un service déterminé.

Dans le premier cas, il pourrait arriver qu'un simple agrandissement des chaudières suffît avec le même foyer, si toutefois la différence entre les quantités produites et les quantités nécessaires au travail était petite; car si elle était grande, il faudrait agrandir tout l'appareil: en faisant le feu plus fort, on obtient de l'appareil tout ce qu'il peut fournir, et aucune modification autre que l'agrandissement de l'appareil ne peut faire dépasser la limite à laquelle on est parvenu.

Dans le second cas, il s'agirait de rétrécir graduellement l'orifice de sortie, pour qu'avec la même intensité de feu la température ne dépassât pas le terme auquel correspond la tension qu'on veut employer, qu'elle ne dépassât pas, par exemple, 104 à 105 degrés centigrades, si l'on travaille à basse pression, comme on le dit vulgairement. Pour rester au même point, quelque feu que l'on fasse dans le cours du travail, il suffira de donner aux conduits le diamètre de l'orifice auquel on s'est arrêté.

Si l'on avait besoin de vapeur à haute pression, on continuerait le rétrécissement de l'orifice jusqu'à ce qu'on fût arrivé au degré de température auquel correspond la tension qu'on veut obtenir par centimètre carré. On pourrait même, sans poursuivre les essais, adopter un orifice qui serait, avec celui qui donne la vapeur à basse pression, dans le même rapport que les orifices indiqués dans nos expériences. Le conduit à vapeur devrait avoir également le diamètre de cet orifice pour être sûr

qu'on ne dépasserait jamais le degré de tension dont on aurait besoin : il est bien entendu ici, pour ce qui précède comme pour ce qui va suivre, que la vapeur sort de la chaudière sans interruption. S'il devait y avoir des momens réguliers et courts d'interruption, on serait obligé de donner à l'orifice un peu plus de diamètre que celui auquel correspond la tension qu'on a dessein d'obtenir.

Dans le troisième cas, lorsque l'essai préliminaire de l'appareil montre qu'il peut produire, en un certain temps, avec le feu le plus fort, une plus grande quantité de vapeur qu'on ne doit en consommer, il faudrait, dans notre système, diminuer les dimensions du foyer, et non modérer le feu, comme c'est l'usage ordinaire.

En mesurant ainsi la puissance de votre appareil avec le feu le plus fort qu'il puisse admettre, et en la proportionnant au service qu'elle doit faire, par une réduction convenable dans les dimensions du foyer, lorsque cette puissance est en excès, vous faites disparaître les chances de danger qui résultent de la possibilité de pousser le feu outre mesure, au delà des besoins du service. Ce ne sont pas les moyens de modérer l'action de la machine qui vous mettront à l'abri de ces chances ; bien au contraire, ils en créeront de nouvelles, en renvoyant dans la chaudière, comme nous le dirons plus loin, tout ce que la machine ne peut consommer, sans perdre la régularité de son mouvement. On a, il est vrai, la ressource des soupapes de sûreté ; mais en admettant qu'elles fassent toujours exactement leurs fonctions, on perd du moins des portions plus ou moins considérables de vapeur, qui s'échappent sans utilité par le canal de ces soupapes.

Essayer la puissance d'un appareil à vapeur, par les moyens que nous proposons, avant de s'en servir, et même après s'en

être servi ; réduire, s'il y a lieu, les dimensions du foyer, quelle qu'en soit la construction, afin de pouvoir, en tout temps, charger ce foyer et pousser le feu autant qu'il peut l'être ; tout cela nous semble facile à faire avec peu de frais, et nous voyons dans cette pratique nouvelle les avantages suivans que nous croyons devoir résumer ici : 1°. règle fixe, pour le chauffeur, d'après laquelle il saura toujours quel feu il doit faire, car ce sera le feu le plus fort ; s'il le néglige, on le verra bien au mouvement de la machine, laquelle a besoin de la plus grande intensité de feu ; 2°. on ne courra jamais la chance de porter la température de la vapeur au delà d'un terme qui ne soit pas connu d'avance, et il y aura dès lors beaucoup moins de risques à courir ; 3°. en ne produisant que les quantités de vapeur nécessaires au travail, on ne dépensera pas inutilement du combustible à la former en excès ; ce qui arrive assez généralement par l'impéritie du chauffeur.

4°. Enfin on pourra obtenir, indépendamment de tout autre moyen, plus de régularité et de modération dans le mouvement de la machine, puisqu'on ne sera jamais dans le cas de produire plus de vapeur qu'elle ne doit en consommer dans son *maximum* d'activité.

Pour compléter ce que nous avons à dire sur les appareils à produire de la vapeur, il s'agit maintenant d'examiner en particulier la chaudière, partie principale de ces appareils.

Dans tout système de construction de chaudière, l'on doit avoir pour but de donner une solidité de beaucoup supérieure à la résistance qu'elles doivent opposer à la tension de la vapeur qu'on a le dessein d'employer, et de les établir sous des formes telles que, sans nuire à leur solidité, elles présentent à l'action du feu la plus grande surface possible.

Leur solidité ne dépend pas seulement de la nature de la ma-

tière dont elle sont composées, mais encore des formes de construction qu'on adopte.

Dans les premiers temps, on s'est quelquefois servi de cuves bien jointes, en maçonnerie, en bois, traversées par des cylindres de fer dans lesquels on fesait le feu. Ces sortes de chaudières, soit qu'elles aient été employées réellement, soit qu'on les ait simplement proposées ou essayées, ont été, en général, perdues de vue, même avant les principaux perfectionnemens de la machine à vapeur.

Aujourd'hui les chaudières se font en tôle de fer ou de cuivre, ou en fonte de fer.

On s'accorde assez généralement à regarder les chaudières de tôle de fer ou de cuivre comme présentant moins de dangers que les chaudières de fonte. Toutes en présentent cependant : celles en tôle, lorsqu'elles ont trop peu d'épaisseur pour l'effort qu'elles peuvent avoir à soutenir, et que, par la manière de river les feuilles les unes avec les autres, on affaiblit la force du métal aux points de rivure; celles en fonte, par les soufflures qui peuvent se trouver dans leur épaisseur, par les inégalités dans cette épaisseur, provenant du défaut de soins dans le moulage; enfin par l'effet de quelques dilatations partielles qui occasionent ou des fissures ou même la rupture des chaudières.

La forme qu'on donne aux chaudières contribue aussi plus ou moins à leur solidité : une chaudière rectangulaire à faces planes est moins propre à résister à l'action de la vapeur, qu'une chaudière cylindrique; aussi ne donne-t-on jamais la première forme aux chaudières à vapeur. Quand elles sont rectangulaires, le dessus est convexe et le fond concave; tous les côtés, pris de l'extérieur seraient concaves que la chaudière n'en serait que mieux disposée pour résister à la pression de la

vapeur, pression énorme si l'on considère la surface entière sur laquelle la vapeur agit.

Cependant, plus cette surface est grande, quant aux parties du moins qui sont toujours baignées d'eau dans le cours du travail, plus le feu employé peut l'être avec économie, eu égard à la quantité de vapeur produite dans une unité de temps.

On a imaginé, pour multiplier les points de la surface exposée au feu, sans nuire à la solidité de la chaudière, de placer au-dessous deux ou plusieurs tuyaux, qu'on nomme *bouilleurs* (voyez l'atlas). Ces tuyaux, d'un petit diamètre en comparaison du corps de la chaudière, débouchent dans celle-ci par une de leurs extrémités, et vont en s'inclinant légèrement jusqu'à l'autre extrémité, aboutissant à la partie antérieure du fourneau. Les bouilleurs, constamment remplis d'eau, sont entourés de la flamme du foyer, s'échauffent très-vivement, et présentent, par la petitesse de leurs diamètres, outre une grande surface relative en contact avec la flamme, une grande force de résistance. L'inclinaison de ces bouilleurs, de laquelle nous venons de parler, facilite l'arrivée dans la chaudière des bulles de vapeur qui se forment en grande quantité dans les bouilleurs.

Quelquefois la chaudière est formée de deux cylindres concentriques, laissant entre eux un espace annulaire qui reçoit l'eau et qu'on ferme hermétiquement. C'est dans le cylindre intérieur qu'est placé le foyer qui, étant ainsi entouré d'eau, exerce son influence sur une surface d'une grande étendue relativement à la masse d'eau à échauffer. Lorsque ces cylindres sont en fonte, il faut qu'ils soient assujettis l'un à l'autre de manière que l'inégalité de dilatation qui a lieu entre le cylindre intérieur et le cylindre extérieur ne fasse point éclater l'un ou l'autre. Cet effet est moins à craindre avec des cylindres en tôle.

En général les chaudières longues et étroites de diamètre sont préférables aux autres, tant sous le rapport de la solidité que sous celui de l'économie du combustible; attendu, pour ce dernier point, que la chaleur, qui émane du foyer, a un plus grand chemin à parcourir sous la chaudière avant de la quitter pour s'échapper par la cheminée.

Quelle que soit au reste la forme qu'on donne à la chaudière, il ne faut jamais la remplir entièrement d'eau; il faut toujours y laisser un espace vide dans lequel la vapeur puisse venir s'accumuler. Dans la pratique, la capacité de ce vide est ordinairement huit à dix fois celle du cylindre de la machine à vapeur.

Cette pratique est fondée sur plusieurs raisons : d'abord parce que dans l'ébullition le mouvement tumultueux de l'eau la fait jaillir avec de la vapeur par l'orifice de la chaudière, et la porte dans le cylindre. Il en passe d'autant plus qu'on a laissé moins de vide dans la chaudière; et lors même que la chaudière serait convenablement chargée, des molécules d'eau sortiraient encore lancées avec la vapeur dans le cylindre, si l'on n'avait la précaution de relever au-dessus du niveau de la chaudière le tuyau de conduite à vapeur.

Ensuite, parce qu'en laissant dans la chaudière assez d'espace pour la vapeur, celle qui s'y forme rend latente une grande quantité de chaleur qu'elle soutire de la chaudière : or, plus la chaudière perd du calorique en faveur de la production de la vapeur, plus elle est disposée à en recevoir du foyer, par l'inégalité de température qu'elle conserve plus long-temps, ainsi que nous l'avons expliqué précédemment.

Il résulte de là que si l'on ne craignait pas la perte de chaleur par le rayonnement de cette portion de chaudière dans laquelle la vapeur s'accumule, il y aurait toujours de l'avantage à for-

mer au-dessus de l'eau une sorte de réservoir à vapeur, d'une capacité beaucoup plus grande que celle qui renferme ce liquide.

Telles sont les attentions qu'il faut apporter dans la construction des appareils à vapeur, tant sous le rapport de la sûreté du service, que sous celui de l'économie du combustible.

Il est une autre précaution à prendre qu'il serait dangereux de négliger; nous voulons parler des soupapes de sûreté, qui sont le principal sujet de la seconde question que nous nous sommes proposée, savoir : *quelles sont les précautions à prendre pour se mettre à l'abri de l'explosion de la vapeur?*

La première précaution à prendre serait, selon nous, de proportionner les dimensions du foyer à la quantité de vapeur dont on a besoin, en suivant la marche que nous avons proposée plus haut. Elle ne suffit pas cependant, et dans quelques cas il faut d'autres garanties pour user avec quelque sécurité d'une force qui, dans un instant, se soumet docilement à toutes nos volontés, et qui, devenue intraitable l'instant d'après, peut déconcerter toutes nos mesures et détruire tout ce qui l'entoure.

Dans notre système, il faut pouvoir se débarrasser de la vapeur, lorsque, par quelque accident ou par quelque maladresse, la machine cesserait de consommer la quantité de vapeur produite dans la chaudière, le feu continuant d'agir comme si la machine travaillait avec l'activité convenable.

Dans le système suivi jusqu'à présent, il faut non-seulement pouvoir se débarrasser de la vapeur dans le cas particulier ci-dessus, mais encore dans les cas plus fréquens où le chauffeur pousserait le feu outre mesure.

C'est à l'emploi de soupapes dites de sûreté qu'on s'est généralement borné pour parvenir à ce but; mais, on ne peut

trop le dire, ce moyen n'a pas mis jusqu'à cette heure à l'abri de tous les accidens.

L'effet d'une soupape de sûreté quelconque est fondé sur le raisonnement suivant : que l'on établisse au-dessus d'une chaudière une tubulure et qu'on ferme cette tubulure par une pièce mobile qui puisse s'enlever complétement à un certain degré de tension de la vapeur renfermée dans la chaudière : si l'on a calculé sur une pression telle que la chaudière soit parfaitement en état de résister à cette pression, et même bien au delà, il est évident que le danger de l'explosion sera écarté, puisque la pièce mobile serait enlevée et laisserait à la vapeur une libre issue pour s'échapper dans l'air, avant que cette vapeur fût arrivée au point de faire craindre pour la chaudière.

La pièce mobile, quelle qu'en soit la forme, porte une tige chargée immédiatement d'un poids calculé d'après la surface que cette pièce présente à la vapeur, et d'après la tension à laquelle on veut élever cette dernière; ou bien cette tige est liée à un levier, à l'extrémité duquel on suspend un poids convenable.

Ordinairement la pièce mobile est plate, et pose tout simplement, sans s'engager, sur le *siége* qu'on lui a pratiqué au sommet de la tubulure. Malgré cette précaution, il arrive encore souvent que la pièce adhère à son siége par l'action de la vapeur sur le métal, et par la pression constante qui la maintient dans sa place. Cette adhérence, rendant le jeu de la soupape plus difficile, peut donner lieu à de graves accidens; aussi place-t-on souvent deux soupapes au lieu d'une, pour avoir moins de chances contre soi. Il arrive encore qu'on entoure tout *l'appareil de sûreté* d'un grillage ou d'une caisse à jour, fermée à clef, pour empêcher les ouvriers de charger les leviers des soupapes de pierres ou de poids dont la lourdeur peut exposer aux plus grands dangers.

On a proposé de substituer, à la soupape de sûreté de la forme ci-dessus, un petit corps de pompe dont le piston fait l'office de soupape; on en voit un exemple, ainsi que de la précédente dans l'atlas. Ce piston doit jouer dans le corps de pompe avec beaucoup de liberté, au risque même de perdre un peu de vapeur; on doit aussi le graisser avec beaucoup de soin, pour éviter l'adhérence aussi dangereuse ici qu'ailleurs.

Il importe, du reste, quelque disposition qu'on adopte, d'enfermer l'appareil de sûreté de telle manière que les ouvriers ne puissent, en aucune façon, augmenter le poids qui réagit contre la vapeur.

Nous proposerions, à ce sujet, une précaution qui, pour les soupapes ordinaires, ne laisserait aucune crainte d'adhérence, et déjouerait tout ce qu'on voudrait faire pour empêcher la soupape de se lever, à un certain degré de tension déterminé : ce serait d'élever verticalement une tige de cuivre, bien droite, dans la chaudière, et de manière qu'une des extrémités de cette tige s'appuyât solidement sur le fond de la chaudière, et que l'autre extrémité vînt toucher la surface inférieure de la soupape; il est évident que lorsque la chaleur de la chaudière serait arrivée au point d'augmenter assez, par la dilatation, la longueur de la tige; celle-ci agirait contre la soupape et la soulèverait infailliblement; il n'y a plus ici d'adhérence possible; il n'y a plus de poids qui empêcherait la tige de soulever la soupape. On conçoit, au reste, très-facilement ce qu'il faut faire, pour que la tige ne soulève la soupape qu'à une température déterminée.

Ce n'est pas tout de prévenir, par tous les moyens possibles, l'adhérence des soupapes, il faut encore que les tubulures, qu'elles ferment, aient une ouverture assez large, pour décharger promptement la chaudière de l'excès de pression qui aura fait lever les soupapes; ces ouvertures doivent être calcu-

lées sur l'étendue de la surface de l'eau exposée au feu, et nous renvoyons pour cela aux règles que nous avons données plus haut.

Lorsque ces ouvertures sont trop étroites, elles n'écartent point le danger que présente un feu violent; on en a eu récemment un terrible exemple.

Ces divers inconvéniens attachés aux soupapes de sûreté ont fait proposer un autre moyen qui a été employé pour quelques chaudières à haute pression : il consiste à percer un trou au fond de la chaudière et à la boucher avec une sorte de tampon formé d'un alliage métallique, ayant la propriété de se fondre à un certain nombre de degrés au-dessus du terme de l'ébullition de l'eau. On a espéré que si la température de la chaudière venait, par malheur, à s'élever jusqu'à ce point, le tampon se fondrait et l'eau serait violemment lancée par le trou sur le feu qu'elle éteindrait.

Un inconvénient grave est encore attaché à ce moyen : il se forme sur les parois intérieures des chaudières une croûte dure, plus ou moins épaisse, qui résulte de l'évaporation de l'eau, et il se peut que le trou sur lequel on compte, après la fusion du tampon métallique, soit recouvert d'une croûte de matières déposées par l'eau, et qu'alors il ne fasse pas son office.

On voit par ce qui précède qu'en dernier résultat la première précaution à prendre, la plus importante, la plus indispensable, est d'exercer une grande surveillance sur la conduite du feu et sur celui qui est chargé de servir la machine, et de s'assurer souvent, surtout pour les machines à haute pression, du degré de tension de la vapeur : la plupart des moyens employés sont peu efficaces, ou illusoires. Nous n'en connaissons pas de meilleurs, de plus infaillibles qu'un ou deux thermomètres placés sur la chaudière même, et pénétrant jusque dans la

vapeur qu'elle renferme. On saura avec nos tables, et par les indications thermométriques, la pression exercée sur une surface d'un centimètre carré au moment de chaque observation.

CHAPITRE XLVII.

Troisième question : *Quels sont les appareils destinés à alimenter d'eau les chaudières à vapeur?*

Dans l'usage de la vapeur, comme force motrice, on en porte toujours la température au delà de 100 degrés centigrades, et la pression au delà d'une atmosphère, à la vérité très-peu au delà pour les machines dites à basse pression. Cependant l'excès, quelque petit qu'il soit, est tel qu'un réservoir d'eau dont le niveau ne serait pas supérieur à celui de l'eau, dont on charge la chaudière, ne pourrait pas convenablement servir à alimenter celle-ci, en mettant l'eau du réservoir en communication avec la chaudière : nous disons convenablement, parce que la vapeur exerçant sur l'eau bouillante une pression un peu supérieure à celle de l'atmosphère, l'eau du réservoir ne pourrait pas entrer d'abord dans la chaudière; c'est-à-dire, aussi long-temps que son niveau ne se trouverait point assez élevé pour vaincre cet excès de pression : mais comme, à la suite d'un abaissement de niveau dans la chaudière, résultant nécessairement de l'évaporation, la pression du réservoir viendrait à prédominer, l'eau froide entrerait, mais en assez grande quantité peut-être à la fois, pour abaisser brusquement la température de la chau-

dière, et y porter un trouble dont on prévoit trop bien maintenant les effets, pour que nous ayons besoin de les décrire.

Il faut donc que le réservoir soit placé de manière que l'eau, par la hauteur de son niveau, puisse vaincre constamment la résistance que la vapeur oppose à son entrée; ou bien il faut exercer sur l'eau alimentaire une pression extérieure capable de vaincre cette résistance, et dans le dernier cas on peut prendre l'eau au-dessous du niveau de la chaudière.

Dans le premier cas, la hauteur du réservoir doit être en un certain rapport avec la tension qu'on veut donner à la vapeur; deux ou trois mètres d'élévation suffisent amplement pour les basses pressions; mais, pour les autres pressions, il faut employer une force étrangère pour faire entrer l'eau alimentaire dans la chaudière. Il serait pour ainsi dire impraticable de ne se servir à cet effet que du poids du liquide, vu la hauteur à laquelle il faudrait élever le réservoir et l'alimenter lui-même; ce qui du reste exige encore l'emploi d'une force étrangère, même pour les basses pressions; car il est rare qu'on ait de l'eau affluente à sa disposition à deux ou trois mètres au-dessus de la chaudière d'une machine à vapeur, pour entretenir l'eau du réservoir alimentaire.

C'est ordinairement une pompe mise en mouvement par la machine elle-même qui entretient la chaudière, et la force de la vapeur fait l'office de la force étrangère dont nous venons de parler.

La pompe sert donc de deux manières pour alimenter les chaudières à vapeur : ou bien elle envoie l'eau, qu'elle puise dans un réservoir élevé au-dessus de la chaudière; ou bien elle l'envoie directement dans la chaudière sans aucun intermédiaire.

Mais ce n'est pas tout que de faire arriver de l'eau dans la

chaudière, il importe qu'elle n'arrive qu'au fur et à mesure qu'elle s'évapore, et par conséquent en quantité telle qu'elle n'influe pas sensiblement sur la température de la chaudière.

Si le feu pouvait être entretenu constamment au même point d'intensité, si dans tous les instans on consommait des quantités de vapeur égales, on pourrait à l'aide de nos expériences et des règles que nous en avons déduites, déterminer combien d'eau s'évapore par seconde ou par minute, et disposer le réservoir de service, ou la pompe, de manière qu'ils ne fournissent que la même quantité d'eau par seconde ou par minute.

Mais il peut y avoir tant de variations dans la conduite du feu et dans les quantités de vapeur consommées, qu'on ne pourrait pas compter sur une alimentation régulière, si l'on n'avait recours à quelques moyens subsidiaires dont nous allons parler.

Il faut dire, avant tout, que le tuyau qui amène l'eau froide traverse la masse d'eau bouillante et débouche toujours à quelques centimètres du fond de la chaudière, afin que la première ne se mêle pas à la seconde, et qu'elle se trouve, dès son arrivée, à la place que lui assigne sa densité. Jamais le tuyau d'eau froide n'est ouvert dans l'espace occupé par la vapeur, parce qu'il y aurait une suite de condensations partielles et momentanées qui pourraient occasioner des accidens, ou du moins porter le trouble dans le service de la chaudière.

Maintenant il est clair que si, en un temps donné, il arrive plus d'eau dans la chaudière qu'elle ne puisse en évaporer, le niveau haussera, et la chaudière et le cylindre même de la machine finiraient par se remplir : la machine s'arrêterait. S'il en arrive moins, le niveau baissera, et la chaudière pourrait s'épuiser entièrement d'eau ; ce qui, dans bien des cas, serait dangereux. Il faut donc, par cette raison encore, qu'on ne remplace

exactement dans la chaudière que les quantités d'eau qui s'évaporent.

Les oscillations du niveau de l'eau, produites et par l'évaporation d'un côté, et de l'autre par les écarts même de l'alimentation, fournissent le moyen de ramener à chaque instant le niveau au point où il doit être. Ce moyen consiste à placer dans la chaudière, sur la surface de l'eau, un *flotteur* qui est ordinairement une pierre de grès plate, portant une tige qui pénètre verticalement à l'extérieur de la chaudière par une boîte à étoupe : cette tige est unie à un levier à contre-poids pour mettre le flotteur en équilibre. Or le flotteur, suivant toutes les oscillations du niveau, fait basculer le levier, soit qu'il y ait trop, soit qu'il y ait trop peu d'eau ; et si l'on a disposé sur ce levier quelque communication avec l'orifice de sortie du réservoir d'eau alimentaire ou avec la pompe, et de telle façon que quand le flotteur s'abaisse le levier fasse ouvrir le tuyau à eau froide du réservoir ou de la pompe, et que lorsqu'il s'élève avec le niveau de l'eau le levier ferme ce tuyau et empêche l'eau froide d'entrer, on concoit que l'alimentation devient régulière, et que le seul effet de l'évaporation peut régler de lui-même l'arrivée de la quantité d'eau dont la chaudière a besoin.

Tels sont les principes d'après lesquels on entretient l'eau destinée à produire de la vapeur ; on en voit dans l'atlas les applications les plus usitées.

Quatrième question : *Quels sont les moyens les plus propres à diriger et à régler l'action de la vapeur ?*

La vapeur produite dans la chaudière n'arrive pas toujours directement dessus ou dessous le piston de la machine : souvent

elle est reçue avant d'agir dans un espace annulaire que laisse un cylindre servant d'enveloppe concentrique au cylindre de la machine; cet espace annulaire reste constamment en communication avec la chaudière et peut en être considéré comme le prolongement. Souvent aussi la vapeur est reçue dans une petite capacité placée à côté du cylindre, et dans laquelle on a groupé les moyens de distribuer la vapeur alternativement dessus et dessous le piston; on appelle cette capacité *boîte à vapeur*.

Ce sont quelquefois des goûts particuliers de construction qui déterminent le choix que l'on fait de l'un de ces trois modes de recevoir la vapeur, avant l'action; cependant, en se servant de l'enveloppe dont nous venons de faire mention, on a principalement pour but de tenir à la température de la chaudière le cylindre dans lequel joue le piston-moteur. Il arrive aussi qu'on emploie simultanément une boîte à vapeur pour la distribution du fluide et une enveloppe comme prolongement de la chaudière.

Les questions relatives à la manière de disposer et d'ouvrir des passages à la vapeur pour donner immédiatement au piston le mouvement alternatif qu'il doit avoir, et pour donner à ce mouvement la régularité et la vitesse convenables, sont toutes des questions de simple construction.

Nous nous rappellerons que, dans tout état de choses, il faut que lorsqu'on ouvre un passage à la vapeur, pour agir dessus ou dessous le piston, on en ouvre, en même temps, un autre pour que la vapeur, qui a servi au mouvement précédent, puisse s'échapper dans l'air, ou se précipiter dans le condenseur, ou enfin passer dans un second cylindre pour agir une seconde fois, si tel est le système de la machine.

L'ouverture simultanée de ces deux passages, que la vapeur

agisse au-dessus ou au-dessous du piston, est de rigueur et une condition fondamentale de tout système de distribution de vapeur, système qu'on nomme communément *régulateur* de la machine.

Ces ouvertures ou passages sont pratiqués, ou sur le noyau d'un robinet conique, qui, suivant le sens dans lequel on le fait tourner, présente à la vapeur les deux issues que réclame chaque mouvement du piston, ou sur deux disques métalliques bien rodés, tournant l'un sur l'autre et distribuant ainsi la vapeur dans des temps marqués, et dans les directions convenables; ou sur des surfaces rectangulaires appliquées et glissant l'une sur l'autre pour ouvrir ou fermer les issues de la vapeur et produisant l'effet ci-dessus; on nomme ce genre de régulateur, *régulateur à tiroirs;* ou enfin on se sert d'un système de soupapes à tiges qui se lèvent et se ferment pour livrer à la vapeur les passages nécessaires à chaque mouvement de la machine.

Les exemples que nous avons donnés, dans l'atlas, de ces différens moyens, en apprendront plus que tout ce que nous pourrions en dire, et nous dispensent d'insister sur ce sujet qui ne nous présente plus à présent aucun point de doctrine à discuter.

Nous ne terminerons pas cependant sans consigner l'observation que le service des robinets est en général moins avantageux que celui des tiroirs; les noyaux de ceux-là s'usent promptement et laissent échapper de la vapeur en pure perte; à la vérité l'on peut resserrer le noyau dans le boisseau du robinet, mais alors *il grippe* et tourne avec difficulté.

En outre, ce qui nous semble encore devoir faire préférer les tiroirs aux robinets, c'est qu'il est difficile avec ceux-ci de donner à la vapeur des ouvertures suffisamment larges pour

n'être point exposée à augmenter inconsidérément la tension de la vapeur dans la chaudière.

Cinquième question : *Quels sont les moyens de modérer l'action de la vapeur lorsqu'elle acquiert un excédant de force?*

Il y a plusieurs manières de modérer l'action de la vapeur, savoir : 1°. par la conduite du feu; 2°. en laissant échapper de la vapeur par les soupapes de sûreté; 3°. en augmentant la résistance du piston; 4°. en diminuant les quantités de vapeur fournies par la chaudière en un temps donné.

Les trois premières n'ont d'autre objet que d'affaiblir l'action de la vapeur pour un temps dont on fixe à volonté la durée; par la dernière, non-seulement on peut modérer cette action, mais encore la rendre plus régulière.

Diminuer les quantités de combustible dont on charge le fourneau, c'est modérer le feu, et par conséquent la puissance de la vapeur : nous n'avons pas à revenir sur ce sujet; mais comme on modère aussi le feu en ralentissant le tirage du fourneau, l'on peut confier à la machine le soin de produire cet effet lorsque la tension de la vapeur s'est élevée jusqu'à une certaine limite; voici comment on s'y prend : s'agit-il d'une machine à basse pression? on interrompt la colonne d'eau qui va du réservoir alimentaire au fond de la chaudière par une soupape mobile unie à une tige, et celle-ci à un levier placé au niveau du réservoir, et communiquant lui-même soit à la porte du cendrier, soit à la clef de la cheminée. Lors donc que la tension de la vapeur est en excès, elle réagit sur la surface de l'eau et soulève la soupape; le levier bascule, et, par ses tiges de communication, ferme en partie la cheminée ou le cendrier. Mais si la tension vient à diminuer, la soupape se remet en

place et par son propre poids et par celui de la petite colonne d'eau qu'elle porte, et le tirage se ranime.

S'agit-il d'une machine à haute pression; au lieu d'envoyer l'eau de la pompe directement dans la chaudière, par un simple tuyau de conduite, on fait aboutir celui-ci dans une capacité surmontée d'un petit corps de pompe avec piston, dont la tige est unie à un levier et fait mouvoir, par les mêmes intermédiaires que précédemment, soit la porte du cendrier, soit la clef de la cheminée : la capacité est remplie d'eau, et la tige du piston est chargée d'un poids qui représente la plus grande tension qu'on veuille donner à la vapeur : or tant que ce degré de tension n'est pas dépassé, le piston reste immobile; mais si la vapeur de la chaudière résiste davantage, par une tension supérieure, à l'arrivée de l'eau, le petit piston doit nécessairement s'élever sous l'effort de la pompe alimentaire, et produire l'effet qu'on en attend.

Nous ne nous arrêterons pas à la manière de modérer l'action de la vapeur en la laissant se dissiper dans l'air, pendant un certain temps, par les soupapes de sûreté; on ne doit s'en servir qu'en cas de danger, et jamais dans un service courant.

Ce n'est pas non plus dans un service courant qu'il est convenable de modérer l'action de la vapeur en augmentant la résistance du piston, à moins que le travail exécuté par la machine ne soit de nature à être facilement augmenté, ce qui, dans ce cas, pourrait être utile; mais la faculté d'augmenter le travail à volonté, et suivant les progrès que la tension de la vapeur peut faire, existe rarement : ce n'est donc pas dans ce sens qu'il faut entendre ce moyen de modérer l'action de la vapeur; voici comment il est toujours praticable : on sait que la vapeur, après avoir déployé son action sur le piston, est

envoyée, ou dans l'air ou dans un condenseur; si donc vous voulez empêcher ce piston de céder aussi facilement à l'excès de pression de la vapeur, vous diminuez, dans le premier système, l'ouverture par laquelle la vapeur s'échappe dans l'air, pour que, présentant plus de résistance à sa sortie, elle réagisse sur le piston contre la vapeur nouvelle; par le second système, vous n'opérez dans le condenseur qu'une faible condensation, en n'y introduisant pas la quantité d'eau nécessaire pour l'effectuer toute entière, ou bien encore vous supprimez la condensation et vous laissez régner dans le condenseur une tension qui entrave et peut arrêter même la marche du piston. On voit que ce moyen, fort efficace sans doute, ne peut être employé que fort rarement et avec beaucoup de précaution et de discernement.

Le quatrième moyen dont nous avons parlé plus haut est d'un tout autre genre; il a pour objet non d'affaiblir le tirage du fourneau, mais de diminuer la quantité de vapeur qu'on introduit dans le cylindre pour chaque mouvement de la machine, lorsqu'un surcroît de tension fait aller cette machine trop vite. Ce moyen consiste à concerter le mouvement même de la machine, avec le jeu d'une *soupape à gorge* ou d'un robinet placé sur le tuyau qui conduit directement ou indirectement la vapeur de la chaudière au cylindre, de telle façon que quand elle va trop vite, la soupape se ferme en partie, et qu'elle ne soit ouverte entièrement que lorsque le mouvement est tel qu'on le désire : voyez dans l'atlas le pendule conique ou le modérateur de Watt et Boulton; c'est le mécanisme le plus généralement usité et celui dont le service est le plus assuré. Ici du moins vous ne perdez point de vapeur, et le jeu de la soupape à gorge est si bien lié avec le mouvement de la machine, qu'il a lieu aussitôt que la vitesse de ce mouvement s'accroît, d'une manière même

à peine sensible à la vue. Il faut bien dire pourtant que si vous modérez l'action de la vapeur sous le piston, vous ne l'affaiblissez nullement dans la chaudière; bien au contraire, vous y accumulez la force en diminuant la consommation. Le service du modérateur n'est donc utile que pour faire disparaître de légers écarts qui se manifestent dans les quantités de vapeur produites en raison de l'action infiniment variable du feu sur la chaudière, quelque régulièrement qu'il soit entretenu.

Sixième question : *Quelles sont les dispositions du piston, du cylindre et de la boîte à étoupes dans laquelle glisse la tige?*

Le piston et le cylindre sont au premier rang parmi les pièces principales d'une machine à vapeur. On conçoit, en effet, que, pour ne rien perdre de la force motrice, lorsqu'elle s'exerce sur son point d'application, il faudrait que le contour du piston touchât si exactement les parois du cylindre, à quelque point qu'il fût de sa course, qu'aucune portion de vapeur ne pût s'insinuer entre le piston et le cylindre, et passer *sur* le piston quand elle agit et doit agir *dessous*, ou passer *dessous* quand elle agit et doit agir *dessus*.

La première chose à faire pour parvenir à ce résultat est de bien alaiser l'intérieur du cylindre, c'est-à-dire de le tourner en dedans de telle façon que sur tous les points de sa surface circulaire intérieure, il soit rigoureusement du même diamètre. C'est bien certainement un degré de perfection duquel on ne peut approcher que plus ou moins dans la pratique; on y arriverait même, qu'il est douteux qu'on pût conserver cet état de perfection, vu les altérations que subit le cylindre, après quelque temps de travail.

On cherche à corriger et les défauts de construction du cylin-

dre, et les altérations auxquelles il est sujet, par les dispositions du piston. On peut, en général, en distinguer de deux espèces : le piston de la première espèce porte sur son pourtour une forte tresse de chanvre, graissée, qu'on nomme *garniture*, et il est composé de manière qu'on peut, au moyen de quelques vis à écrous, serrer cette tresse sur elle-même et la faire renfler pour qu'elle touche bien exactement les parois intérieures du cylindre. Voyez l'atlas pour ce qui concerne la composition de ce piston.

Le piston de la seconde espèce n'a pas ordinairement de garniture de chanvre; il porte, à la place, plusieurs rangées de segmens de cuivre superposés et à recouvrement, que des ressorts doivent maintenir constamment appliqués contre la paroi du cylindre. Ce genre de piston présente l'inconvénient grave de s'user lui-même et d'user inégalement la surface intérieure du cylindre, ce qui provient du défaut d'homogénéité des surfaces métalliques, frottant si activement l'une sur l'autre dans le travail de la machine.

Nous renvoyons du reste à l'atlas pour les détails de ce piston, ainsi que pour ce qui concerne la construction des boîtes à étoupes; il serait superflu d'insister sur ce point; cependant nous ne quitterons pas ce sujet, sans consigner une remarque que nos diverses expériences sur la vapeur nous ont fournie : c'est qu'à une température de 100 à 110 degrés centigrades, les pistons *bien faits*, soit à garniture, soit à segmens métalliques, tiennent assez bien la vapeur; mais au-dessus de 125 degrés la vapeur passe entre le piston et le cylindre, quelque bonne que soit la construction de ces deux pièces, et elle fuit en quantités d'autant plus grandes, que le piston va moins vite. Cette fuite de vapeur est aussi grandement favorisée par l'effet de l'expansion.

Septième question : *Enfin quels sont les meilleurs moyens de condensation et de production de vide?*

S'il s'agissait de répondre à cette question d'une manière générale, il suffirait de dire que la meilleure manière d'opérer la condensation par les machines à vapeur qui l'admettent comme une des conditions fondamentales de leur force, est de projeter immédiatement de l'eau froide sur la vapeur qui arrive dans la capacité où elle doit se condenser. C'est ainsi du moins que cette opération se fait avec une grande promptitude, et comme il est nécessaire, pour ne pas embarrasser la marche de la machine : aussi ce mode est le plus généralement usité; mais nous avons à entrer dans quelques détails relatifs à ce mode, comme à ceux qui peuvent le suppléer.

Il y a deux manières de mettre l'eau froide en contact immédiat avec la vapeur : ou l'on se borne à baigner constamment d'eau froide le fond du condenseur; la vapeur alors, reposant sur cette surface liquide, se condense rapidement par couches horizontales qui se précipitent les unes sur les autres à mesure que le vide partiel s'établit entre la vapeur et la surface de l'eau froide; ou bien l'on dirige le jet d'eau froide sur le jet de vapeur au moment qu'il pénètre dans le condenseur : cette dernière est brusquement saisie au passage, et si l'eau froide est fournie avec assez d'abondance, la condensation est plus complète et surtout plus instantanée que par l'autre manière; ajoutons qu'il faut pour cela encore que le jet d'eau froide, divisé en un grand nombre de petits filets, embrasse en quelque sorte tout le jet de vapeur.

Pour opérer avec avantage par le simple contact de l'eau froide répandue sur le fond du condenseur, il importe de donner à celui-ci des dimensions plus grandes qu'avec l'autre procédé,

afin de suppléer par l'étendue de la surface refroidissante à ce qui manque en rapidité d'action. A la vérité, la vapeur est ici en repos lorsqu'elle touche le corps froid, et c'est une considération en faveur de ce système.

On fait aussi agir l'eau froide sur de la vapeur en repos ou arrivant au repos, dans le second système, en dirigeant cette eau froide du centre même du condenseur, et de telle façon que les jets qui jaillissent de l'orifice pénètrent dans le volume de vapeur suivant toutes les directions et l'atteignent sur tous les points.

Ce sont, au reste, les dispositions qu'on veut donner au condenseur qui déterminent le placement de l'orifice par lequel l'eau froide doit jaillir; et quand on ne place pas cet orifice au centre du condenseur, c'est le plus près possible de celui par lequel la vapeur arrive qu'il faut le faire aboutir, afin que l'eau froide agisse avant que la vapeur ait commencé à prendre de l'expansion : on la saisit ainsi au moment où elle est la plus susceptible de condensation, c'est-à-dire au moment où une partie de sa chaleur sensible n'est pas encore devenue latente. On peut dire en général que la condensation est d'autant plus prompte que la vapeur est plus dense.

Cette condensation, au reste, qu'elle soit opérée de la première ou de la seconde manière, n'est jamais que partielle. Elle n'est que partielle, parce qu'il reste non-seulement toute la quantité de vapeur qui résulte de la température dont l'intérieur du condenseur est constamment affecté, mais encore toute celle qui, par son mélange avec l'air provenant principalement de l'eau d'injection, résiste à la condensation.

Il faut dès lors se débarrasser de ce mélange d'air et de vapeur pour obtenir dans le condenseur le degré de vide nécessaire au mouvement du piston. Pour cela on emploie une

pompe dite *pompe à air*, au moyen de laquelle on évacue l'eau qui a servi à la condensation, et l'eau condensée, ainsi que des portions plus ou moins grandes de ce mélange d'air et de vapeur dont on vient de parler. L'on donne ordinairement à cette pompe à air les *deux tiers* du diamètre du cylindre à vapeur; et, à la course de son piston, la moitié de celle du piston moteur; ce qui prouve jusqu'à quel point la simple condensation serait insuffisante.

Elle ne le serait pas à ce point cependant si, au lieu de faire entrer l'eau froide dans le condenseur, on se bornait à refroidir constamment les parois de celui-ci avec un courant d'eau, ou avec de l'eau fréquemment renouvelée : la condensation ne s'opérerait pas ainsi par le contact immédiat de l'eau froide, et il n'y aurait dans le condenseur que quelques portions d'air venues de la chaudière, et qui seraient enlevées par une pompe dont il faudrait toujours se servir pour épuiser le condenseur de la vapeur repassée à l'état liquide et pour la reporter dans la chaudière.

On conçoit qu'il importe de donner aux surfaces d'un condenseur de ce genre la plus grande étendue possible, ainsi qu'on le pratique pour les serpentins des appareils distillatoires.

On n'emploie cependant point ce système pour les machines à basse pression; la condensation ne serait ni assez prompte, ni assez régulière : pour la machine à haute pression, on s'en sert quelquefois; mais quand on veut condenser la plus grande partie de la vapeur, il faut consommer beaucoup d'eau froide, ce qui, dans bien des circonstances, est un grand inconvénient.

Il serait superflu de dire que la condensation spontanée dans un vase fermé c'est-à-dire par simple contact du vase avec l'air ambiant, ne serait pas praticable : ce que nous savons des

propriétés de la vapeur suffit pour la démontrer et nous dispense d'en donner les raisons.

Enfin il résulte de ce qui précède que les circonstances les plus favorables à une prompte condensation sont : 1°. le contact immédiat de l'eau froide avec *tous les points* du volume de vapeur à condenser ; 2°. la plus grande densité relative de cette vapeur ; 3°. le courant de vapeur arrivé au repos, ou si l'on veut, l'*état de calme* de la vapeur.

CHAPITRE XLVIII.

De la puissance mécanique de la vapeur ; évaluation pratique de cette puissance ; vitesse du point d'application.

Lorsque, dans les chapitres précédens, nous avons parlé de la force de la vapeur, nous n'avons pu le faire que d'une manière vague, indéterminée ; et quand nous avons examiné les divers degrés de tension que ce fluide acquiert à différentes températures, nous n'avons pas voulu exprimer la valeur de sa *puissance mécanique* dans le sens que nous sommes convenus d'attacher à ce mot : il aurait fallu dire quel poids on peut élever dans une unité de temps, à telle hauteur, avec de la vapeur s'exerçant à un degré quelconque de température sur une surface mobile, sur un point d'application d'une certaine étendue. Or il n'a été question jusqu'à présent que du poids qui, en diverses circonstances déterminées, peut faire équilibre à l'effort déployé par la vapeur contre les enveloppes qui la contiennent, effort désigné sous le nom de tension.

Cette tension est bien le principe de la puissance mécanique de la vapeur, mais non cette puissance elle-même. Il s'agit donc maintenant de chercher quel degré de la seconde correspond à chaque degré de la première; c'est de là qu'il nous semble nécessaire de partir pour évaluer d'une manière utile, applicable, la force de ce moteur.

Nous croyons que ce serait une pure spéculation, et même une extension abusive de la puissance du raisonnement et du calcul, que de vouloir déduire *à priori*, la valeur de la force motrice de la vapeur, de son degré de tension. Que l'on compare seulement ce que nous savons de la vapeur, avec ce qu'il faut savoir de la gravité pour déterminer, au moyen du calcul, l'effet mécanique produit par la chute d'un poids connu, et l'on verra tout ce qu'il faudrait pour combler l'intervalle qui sépare les circonstances de la vapeur en équilibre avec une force égale et opposée, de celles qui l'accompagnent quand elle vient à se mouvoir et à pousser devant elle une résistance qu'il lui faut vaincre. Il y a, pour ainsi dire, l'infini entre l'équilibre et le mouvement.

C'est donc à de nouvelles expériences qu'il a fallu avoir recours, afin de pouvoir traiter ce sujet; nous allons rapporter dans le tableau suivant ce que nous en avons obtenu. On s'est servi pour ces expériences de l'appareil précédent; on a eu la précaution d'entretenir le cylindre à la température de la chaudière. On a mesuré le temps avec un pendule marquant bien exactement et fort distinctement les demi-secondes. On laissait entrer la vapeur, à peu de chose près, pendant toute la durée de la course du piston.

EXPÉRIENCES

Pour déterminer la vitesse du piston de 53 millimètres de diamètre, chargé de divers poids, sur lequel on fait agir de la vapeur à différens degrés de température. La course du piston est de 40 cent.,5. Baromètre, 767 millim. : pression atmosphérique sur la base du piston, 23 kil.,009. Les frottemens ont été compensés par des contre-poids.

Thermomètre centigrade.	POIDS élevé contre l'atmosphère par le piston ci-dessus, ou par 22,06 cent. carrés de surface.	POIDS élevé contre le vide par 22,06 cent. carrés de surface du piston.	POIDS élevé contre l'atmosphère par centim. carré de surface du piston.	POIDS élevé contre le vide par centimètre carré de surface de piston.	Durée de la course exprimée en secondes	PUISSANCE mécanique sur le vide, par centim. carré, exprimée en kilogr. élevés à 1 centimet. de hauteur en une seconde.
Degrés.	Kilo.	Kilo.	Kilo.	Kilo.		
110 .	9,0 . . .	32,009 . .	0,408 . .	1,451 . .	Équilibre.	Kilogrammes.
110 .	7,0 . . .	30,009 . .	0,317 . .	1,360 . .	1 ½″ .	36,720
110 .	5,0 . . .	28,009 . .	0,226 . .	1,269 . .	1 .	51,394
110 .	4,0 . . .	27,009 . .	0,181 . .	1,224 . .	½ .	99,144
115 .	14,0 . . .	37,009 . .	0,634 . .	1,677 . .	Équilibre.	
115 .	12,0 . . .	35,009 . .	0,543 . .	1,587 . .	1 ½″ .	42,849
115 .	11,0 . . .	34,009 . .	0,498 . .	1,541 . .	1 ¼ .	
115 .	10,0 . . .	33,009 . .	0,453 . .	1,496 . .	1 .	60,588
115 .	9,0 . . .	32,009 . .	0,408 . .	1,451 . .	½ .	117,531
120 .	21,0 . . .	44,009 . .	0,952 . .	1,994 . .	Équilibre.	
120 .	19,0 . . .	42,009 . .	0,861 . .	1,904 . .	1 ½″ .	51,408
120 .	17,0 . . .	40,009 . .	0,770 . .	1,813 . .	1 .	73,426
120 .	16,0 . . .	39,009 . .	0,725 . .	1,768 . .	¾ .	
120 .	15,0 . . .	38,009 . .	0,680 . .	1,723 . .	½ .	139,563
123 .	25,0 . . .	48,009 . .	1,133 . .	2,176 . .	Équilibre,	
123 .	23,0 . . .	46,009 . .	1,042 . .	2,085 . .	1 ½″ .	56,295
123 .	21,0 . . .	44,009 . .	0,952 . .	1,994 . .	1 .	80,757
123 .	20,0 . . .	43,009 . .	0,907 . .	1,950 . .	½ .	157,950
125 .	29 . . .	52,009 . .	1,314 . .	2,357 . .	Équilibre.	
125 .	27 . . .	50,009 . .	1,223 . .	2,267 . .	1 ½″ .	61,209
125 .	26 . . .	49,009 . .	1,178 . .	2,221 . .	1 ¼ .	
125 .	25 . . .	48,009 . .	1,133 . .	2,176 . .	1 .	88,128
125 .	24 . . .	47,009 . .	1,088 . .	2,130 . .	½ .	172,530
130 .	36 . . .	59,009 . .	1,631 . .	2,674 . .	Équilibre.	
130 .	34 . . .	57,007 . .	1,541 . .	2,584 . .	1 ½″ .	69,768
130 .	32 . . .	55,009 . .	1,450 . .	2,493 . .	1 .	100,966
130 .	30 . . .	53,009 . .	1,361 . .	2,404 . .	½ .	194,724
140 .	58 . . .	81,009 . .	2,629 . .	3,672 . .	Équilibre.	
140 .	56 . . .	79,001 . .	2,538 . .	3,581 . .	1 ½″ .	96,687
1·0 .	55 . . .	78,009 . .	2,493 . .	3,536 . .	1 ¼ .	
1ʃ0 .	54 . . .	77,009 . .	2,448 . .	3,490 . .	1 .	141,345
140 .	53 . . .	76,009 . .	2,403 . .	3,446 . .	½ .	279,126

L'échelle sur laquelle nous avons opéré est, à la vérité, fort peu étendue; mais les résultats portés dans ce tableau sont très-exacts et proviennent d'expériences répétées plusieurs fois et suivies avec la plus scrupuleuse attention. Nous pensons dès lors qu'elles peuvent servir de base pour évaluer, d'une manière aussi approchée que la pratique l'exige, la puissance mécanique de la vapeur dans les cas du moins où on la fait agir comme il est dit plus haut.

Quoi qu'il en soit, l'examen de ce tableau donne lieu aux remarques suivantes.

1°. A 110 degrés centigrades, la charge, y compris la pression atmosphérique qui fait équilibre à la tension de la vapeur sur le piston, est de 32 kil.,009. Pour faire parcourir, par exemple, à ce piston une course de 40 cent. 5 en une demi-seconde, ou ce qui peut être considéré comme la même chose quand il s'agit d'une évaluation approximative dont il faut bien se contenter dans le calcul des *forces mécaniques industrielles*, pour obtenir une vitesse de 81 centimètres par seconde, il faut diminuer de 5 kilogrammes la charge qui fait équilibre. On élèvera donc à 81 centimètres de hauteur un poids de 27 kil.,009 en une seconde de temps avec un piston de 53 millimètres de diamètre. Donc la puissance mécanique de la vapeur à 110 degrés centigrades peut être représentée, pour chaque centimètre carré de surface, pour la vitesse ci-dessus, par 1 kil.,224 environ, élevés en une seconde à 81 centimètres de hauteur.

2°. A 115 degrés, la charge d'équilibre sur le piston est de 37 kil.,009, et pour obtenir la même vitesse de 81 centimètres par seconde, il faut diminuer cette charge de 5 kilogrammes, ce qui revient à dire que la puissance mécanique de la vapeur à 115 degrés centigrades, avec cette vitesse, est de 1 kil.,451,

élevés à 81 centimètres de hauteur, en une seconde, pour un centimètre carré de surface.

3°. A 120 degrés, la charge d'équilibre sur le piston est de 44 kil.,009; et pour obtenir la vitesse ci-dessus, on a diminué la charge de 6 kilogrammes, et la puissance mécanique de la vapeur à 120 degrés centigrades, avec cette vitesse est de 1 kil.,723 élevés à 81 centimètres de hauteur, en une seconde, pour chaque centimètre carré de surface de piston.

4°. A 123 degrés, la charge d'équilibre est de 48 kil.,009; et pour obtenir la vitesse ci-dessus, il a fallu diminuer cette charge de 5 kilogrammes et la puissance mécaniqne à 123 degrés centigrades, avec cette vitesse, est de 1 kil.,950 élevés en une seconde, à 81 centimètres de hauteur, pour chaque centimètre carré de surface de piston.

5°. A 125 degrés, la charge d'équilibre est de 52 kil.,009, et pour obtenir la vitesse ci-dessus, il a fallu diminuer la charge de 5 kilogrammes, et la puissance mécanique, avec cette vitesse, et à 125 degrés centigrades, est de 2 kil.,130 élevés en une seconde à 81 centimètres de hauteur, pour chaque centimètre carré de surface.

6°. A 130 degrés, la charge d'équilibre est de 59 kil.,009; et pour obtenir la vitesse ci-dessus, il a fallu diminuer cette charge de 6 kilogrammes, et la puissance mécanique, à 130 degrés centigrades, avec cette vitesse, est de 2 kil.,404 élevés à 81 centimètres de hauteur, en une seconde, pour chaque centimètre carré de surface.

7°. Enfin à 140 degrés, la charge d'équilibre est de 81 kil.,009 et pour obtenir la vitesse ci-dessus, il a fallu diminuer cette charge de 5 kilogrammes, et la puissance mécanique de la vapeur, à 140 degrés centigrades, avec cette vitesse, est de 3 kil.,446

élevés, en une seconde, à 81 centimètres de hauteur, par chaque centimètre carré de surface du piston.

On peut déduire de ces remarques la conséquence importante *que la différence entre la charge d'équilibre et celle qui correspond à une vitesse de* 81 *centimètres par seconde peut être considérée comme constante à toutes les températures.* En effet cette différence a été constamment de 5 kilogrammes; elle n'a varié que deux fois dans le cours de ces expériences; ce qu'on peut attribuer à quelque erreur d'observations, relative, probablement à la charge d'équilibre.

On voit, d'après la cinquième colonne du tableau, que *cette différence est de* 226 *grammes à peu près par centimètre carré de surface du piston, et avec la vitesse ci-dessus, pour toutes les températures.*

Si l'on comparait maintenant la charge d'équilibre avec celle qui correspond à une vitesse de 40 cent., 5 par seconde, d'après le tableau, ou de 81 centimètres par 2 secondes, on trouverait *que, pour cette vitesse, la différence qui existe entre l'une et l'autre est de* 181 *à* 182 *grammes.*

Ce qui semble autoriser à tirer une seconde conséquence importante, savoir : *que quelle que soit la pression de la vapeur, qu'elle soit ce qu'on appelle vulgairement, à basse, moyenne ou à haute pression*, il existe, à peu de chose près, la même *différence pour toute espèce de vapeur entre la charge d'équilibre et celle qui correspond à un degré de vitesse déterminé.*

Dès lors on pourrait savoir *approximativement* quelle est, par centimètre carré, la puissance mécanique de la vapeur, à un degré quelconque de température au-dessus de 100 degrés centigrades, et capable d'imprimer au piston une vitesse, par exemple, de 81 centimètres par seconde; il faudrait soustraire 226 grammes du nombre qui exprime, dans nos tables, la ten-

sion de la vapeur, soit contre le vide, soit contre l'atmosphère; le reste indiquerait cette puissance mécanique par centimètre carré; si la vitesse n'était que de moitié, on ne soustrairait que 182 grammes, comme nous l'avons vu plus haut.

Que si le piston n'agissait que sur un vide partiel, tel qu'il est toujours dans le condenseur, il faudrait préalablement soustraire la tension qui règne dans le condenseur de la tension totale de la vapeur sur le vide, et soustraire ensuite la différence 226 ou 182 grammes, suivant l'une ou l'autre des vitesses ci-dessus imprimées au piston.

On remarque aussi une différence constante pour toutes les températures entre les charges, correspondant respectivement, l'une à une vitesse de 40$^{\text{cent.}}$,5 par seconde, l'autre à une vitesse de 40$^{\text{cent.}}$,5 par demi-seconde, et ce rapport est de 44 à 46 grammes; de sorte qu'en ôtant ce poids, par centimètre carré de la charge animée d'une vitesse de 40$^{\text{cent.}}$,5 par seconde, on obtiendrait une vitesse double.

Il est important de remarquer en outre que, puisqu'aux divers degrés de température cités dans le tableau ci-dessus, le rapport arithmétique des charges est le même pour passer d'un degré de vitesse à un autre, il y a évidemment plus d'avantage, sous le rapport de l'effet mécanique, de se servir de vapeur à haute qu'à basse pression, attendu que la charge résultant d'une haute pression est diminuée dans une moindre proportion, pour avoir, par exemple, une vitesse double que ne le serait celle qui appartient à une basse pression.

En effet, si vous opérez avec de la vapeur à 110 degrés centigrades, vous élèverez une charge de 1$^{\text{kil.}}$,269 à 81 centimètres en deux secondes, par centimètre carré de surface de piston; et pour obtenir une vitesse double, il faudra, d'après nos expériences, diminuer cette charge d'*un vingt-huitième* à peu près;

mais portez cette vapeur à 140 degrés, vous élèverez une charge de 3 kil.,490 à 81 centimètres en deux secondes par centimètre carré ; et pour doubler la vitesse, ce ne sera pas proportionnellement qu'il s'agira de diminuer cette charge, ce sera seulement d'un *soixante-dix-huitième* à peu près, c'est-à-dire environ trois fois moins que si la diminution était en raison des charges.

Cette différence paraîtra considérable quand on réfléchira au nombre de centimètres carrés que donne la surface du piston d'une machine à vapeur fort ordinaire.

Appliquons maintenant ce que l'expérience vient de nous apprendre, à une machine mue par la vapeur à son *maximum* de force relative, c'est-à-dire agissant sans expansion.

Supposons d'abord que ce soit une machine sans condenseur qui renvoie la vapeur dans l'air.

Le piston de cette machine a une surface de 2000 centimètres carrés ; sa course est de 162 centimètres ; on ne veut travailler qu'à deux atmosphères et avec une vitesse de 30 *pulsations*, ou de quinze levées et de quinze descentes de piston par minute, c'est-à-dire avec une vitesse de 81 centimètres par seconde.

Puisque la machine agit en opposition avec la pression atmosphérique, sa force motrice doit être représentée par la différence qu'il y a entre la tension réelle de la vapeur à 122 degrés centigrades de température et la pression de l'air. Prenons donc d'après les tables de tension et pour valeur moyenne de cette différence, 1 kil.,036, par centimètre carré : mais ce dernier nombre exprime la charge d'équilibre, et nous avons appris, par ce qui précède, que pour obtenir une vitesse de 81 centimètres par seconde, il fallait diminuer cette charge de 226 grammes : effectuant cette soustraction, nous trouvons que la force de la vapeur, qui s'exerce sur chaque centimètre carré, est de

810 grammes avec la vitesse ci-dessus, et sur la surface entière du piston, de 2000 × 810 grammes ou 1620 kilogrammes. Or, comme ce poids est élevé à 81 centimètres par seconde, la puissance mécanique de la machine sera représentée par 131220 kilogrammes, élevés à un centimètre par seconde, ou 1312^{kil},20 élevés à un mètre dans le même temps.

Telle est la force réelle de cette machine, mais non l'effet utile qu'elle peut produire : il faut en déduire les pertes de vapeur, les frottemens et du piston et des autres pièces qu'elle doit mettre en mouvement, ainsi que quelques autres résistances occasionées par les divers accessoires de la machine.

On ne peut guère évaluer ces résistances qu'approximativement et par l'expérience, ce qui est assez facile lorsque la machine porte un volant : il s'agira d'attacher, sur un des bras de celui-ci, un poids suffisant pour mettre la machine en mouvement ; ce poids exprimera la valeur des résistances passives et ce qu'il faut au moins soustraire de la puissance mécanique, pour avoir l'effet utile dont la machine est susceptible.

Supposons maintenant qu'au lieu d'une course de piston de 162 centimètres, notre machine n'en eût qu'une de 81 centimètres, qu'elle travaillât de même à 30 pulsations par minute, et avec de la vapeur à 122 degrés; sa vitesse sera moitié moindre que celle de la machine précédente, c'est-à-dire de 40^{cent},5 par seconde; mais aussi l'on dépensera la moitié de vapeur, puisque le piston étant le même et jouant dans un cylindre raccourci de moitié, le volume de vapeur nécessaire pour chaque pulsation dans le premier cas est le double de celui dont on a besoin dans le second; voyons dans quel rapport la puissance mécanique de cette dernière machine se trouvera avec celle de la première.

Rappelons-nous que pour n'avoir qu'une vitesse de 40^{cent},5

par seconde, il ne faut diminuer la charge d'équilibre que de 182 grammes ; dès lors la force, par centimètre carré, sera de 854 grammes et sur le piston tout entier, de 2000 × 854$^{gr.}$ = 1708 kilogrammes avec une vitesse de 40$^{cent.}$,5 par seconde. La puissance mécanique est donc représentée par 69174 kilogrammes élevés à un centimètre de hauteur par seconde, ou 691$^{kil.}$,74 à un mètre.

Il résulte clairement de cette comparaison que la vapeur dépensée étant = 1 dans le dernier cas, l'effet produit est représenté par 691$^{kil.}$,74 élevés à un mètre par seconde ; tandis que dans le premier cas, la vapeur dépensée étant = 2, l'effet produit n'est pas double, puisqu'il n'est équivalent qu'à 1312$^{kil.}$,20 élevés à un mètre par seconde. La vitesse de 40$^{cent.}$,5 par seconde, donne donc proportionnellement un plus grand effet mécanique que celle de 81 centimètres dans le même temps, et la différence ici pour un piston de 2000 centimètres carrés est de 71$^{kil.}$,28 élevés à un mètre par seconde.

Si maintenant on détermine l'effet mécanique produit par notre piston avec la vitesse de 40$^{cent.}$,5 en 1 seconde et demie, on trouvera qu'il est proportionnellement plus fort que celui qui correspond à une vitesse de 40$^{cent.}$,5 en une demi-seconde, et à celle de 40$^{cent.}$,5 en une seconde, eu égard à la quantité de vapeur dépensée dans l'unité de temps ; il semble donc qu'on est fondé à conclure que l'effet mécanique est d'autant plus grand proportionnellement, eu égard à la quantité de vapeur dépensée, que la vitesse du piston est plus petite.

On pense bien que ce que nous avons dit plus haut sur la manière d'évaluer l'effet mécanique de la machine à vapeur en question, après avoir déterminé la température à laquelle on porterait la vapeur, s'applique à toute autre machine de ce genre dont on voudrait connaître l'effet, dans un instant quel-

conque de son service : il suffit de prendre la température de la vapeur dans la chaudière avec un thermomètre centigrade, pour connaître la charge d'équilibre au moment de l'ébullition, et se servir ensuite des règles que nous avons proposées, d'après nos expériences, pour déterminer le poids en kilogrammes que la machine est capable d'élever à un mètre en une seconde de temps.

Voilà pour ce qui regarde l'évaluation approximative d'une machine sans condenseur; supposons à présent qu'elle en ait un.

S'il était possible que le vide fût absolu dans le condenseur, le calcul serait tout aussi simple que précédemment : c'est une quantité équivalente à la valeur de la pression atmosphérique qu'il faut ajouter à la tension de la vapeur sur l'atmosphère; mais comme le vide ne peut jamais être que partiel, la puissance effective n'est que la différence qu'il y a entre la tension de la vapeur dans la chaudière, et celle qui règne dans le condenseur.

Admettons donc que la machine travaille avec de la vapeur dont la tension soit équivalente à deux atmosphères de pression, soit à 2kil.,072 par centimètre carré, et qu'un tube barométrique, par exemple, placé sur le condenseur pour reconnaître la tension que conserve le mélange d'air et de vapeur dont nous savons qu'on ne le débarrasse qu'imparfaitement; que ce tube barométrique, disons-nous, indique une tension équivalente à une colonne de mercure de 19 centimètres; il s'en suivra que la vapeur aura à vaincre une résistance égale au quart de la pression atmosphérique, indépendamment de l'effet utile qu'elle doit produire; la force de la vapeur sur le piston sera donc réduite, par centimètre carré, à 2kil.,072, moins le quart d'une atmosphère, c'est-à-dire moins 259 grammes, en un mot à 1kil.,813, qui est la charge d'équilibre.

La puissance mécanique va dépendre maintenant de la vitesse du piston moteur. Supposons que celle-ci soit de 81 centimètres par seconde : dans ce cas nous savons qu'il faut soustraire 226 grammes de la charge ci-dessus, et multipliant ce reste par 2000 centimètres carrés, surface du piston, et le produit de cette multiplication par 81 centimètres, nous aurons $2570^{kil},94$ élevés à un mètre en une seconde, pour la puissance mécanique, ou pour l'effet mécanique, abstraction faite de toutes les circonstances qui le réduisent dans la pratique.

Que si la vitesse n'est que de $40^{cent.},5$ par seconde, nous n'avons à soustraire, de la charge d'équilibre, que 182 grammes, et, multipliant ensuite le reste par 2000 et le produit par $40^{cent.},5$, nous trouvons $1321^{kil},11$ élevés à un mètre en une seconde : ce qui nous donne une puissance mécanique proportionnellement plus grande que dans le cas précédent, où l'on emploie une quantité double de vapeur dans le même temps, sans obtenir un résultat double, ainsi que nous l'avons déjà remarqué plus haut.

Nous avons calculé sur un quart d'atmosphère de tension dans le condenseur; une bonne machine n'en doit pas offrir un huitième; prenez néanmoins cette dernière fraction dans le cas de $40^{cent.},5$ de vitesse par seconde, la charge d'équilibre sera à peu près de $1^{kil},943$, et vous trouverez, pour puissance mécanique, $1426^{kil},41$ élevés à un mètre en une seconde. Vous voyez que cette seule différence dans l'état du vide que présente le condenseur, augmente la puissance mécanique de près de 100 kilogrammes élevés à un mètre par seconde.

Si l'état du vide a une influence si remarquable sur la valeur relative de la puissance mécanique, l'élévation de température de la vapeur en a une très-grande aussi, comme nous allons le voir.

Prenons pour la tension de la vapeur, 4 kil.,144 par centimètre carré; déduisant de cette tension 129 grammes pour le huitième d'atmosphère qui réagit contre la vapeur, nous aurons pour la charge d'équilibre 4kil.,015.

Pour avoir la vitesse ci-dessus, il faudra soustraire de cette charge 182 grammes; ce qui nous donne pour la force effective de la vapeur 3 kil.,833 par centimètre carré. Multipliant donc ce nombre par 2000 et le produit de cette multiplication par 40 cent.,5, nous trouvons que la puissance mécanique est représentée par 3104 kil.,73 élevés à un mètre en une seconde.

Mais, travaillant à 4 atmosphères, nous dépensons, dans le même temps, le double de vapeur qu'à 2 atmosphères, puisque la densité de cette vapeur est double, et tout ce que nous obtiendrons au delà de *deux fois* la puissance mécanique que produit une tension de 2 atmosphères, représentera l'avantage résultant d'une plus haute température, avec la même machine. Or cet avantage est de 251 kil.,91 élevés à 1 mètre en une seconde.

On s'expliquera aisément ce résultat, si l'on fait attention que la différence entre la charge d'équilibre et celle qui correspond à la vitesse ci-dessus, doit être la même pour une basse, une moyenne, comme pour une haute pression qui, comme on sait, est représentée par un poids beaucoup plus grand.

L'avantage serait bien plus considérable encore, si dans les deux cas ci-dessus, la machine n'avait point de condenseur; qu'on eût, par conséquent, la pression atmosphérique toute entière en opposition : à 2 atmosphères, la puissance mécanique serait représentée par 691 kil.,74 élevés à 1 mètre par seconde; et à 4 atmosphères, elle le serait par 2370 kil.,06 élevés aussi à un mètre dans le même temps. On voit ici qu'en dépensant le

double de vapeur, on a une puissance mécanique qui est plus de trois fois plus grande.

Il faut, dans les deux cas, envoyer dans le cylindre, à chaque seconde, environ 81000 centimètres cubes de vapeur; mais, dans le premier, ce volume représente à peu près 96 grammes d'eau, et dans le second près de 192.

Telle est la puissance mécanique de la vapeur dans les diverses circonstances dont nous avons parlé; mais quel est le rapport de cette puissance à l'effet utile produit, dans les mêmes circonstances?

Si, comme nous l'avons remarqué plus haut, il n'existait pas de causes de perte, occasionées par la manière dont les machines sont construites, il est évident que l'effet mécanique représenté par un poids élevé à une certaine hauteur, en un certain temps, serait égal à la puissance mécanique. Mais ces causes existent : il en est d'inhérentes à la nature même de ces machines, il en est qui ne sont qu'accidentelles ou dont l'influence du moins peut être affaiblie par une construction soignée. Nous n'entendons pas parler ici des pertes occasionées par l'appareil à produire de la vapeur; il ne s'agit que de la machine, à partir du point d'application de la force jusqu'au point où le travail s'exécute.

Examinons ces causes avec ordre.

1°. Le piston qui, comme on le sait, est destiné à recevoir et à transmettre immédiatement l'action de la vapeur, donne lieu à une perte de force plus ou moins considérable, et par son frottement contre les parois du cylindre, et par la vapeur qui, s'ouvrant un passage entre le piston et les parois, s'échappe et va réagir au point opposé à celui sur lequel l'action utile s'exerce.

Le frottement est inévitable, et il est, en général, d'autant plus grand que le piston contient mieux la vapeur, c'est-à-dire

qu'il s'applique plus fortement et plus exactement contre les parois du cylindre. On ne peut pas dire *à priori* quelle est la valeur de ce frottement; il varie non-seulement pour chaque espèce de piston, pour chaque diamètre; mais le même piston, dans la même machine, présente encore une résistance de frottement différente, suivant qu'il est nouvellement ou anciennement garni ou resserré; ce ne peut être qu'en faisant descendre ou monter le piston par des poids connus, par une force connue qu'on peut juger d'une manière suffisamment approchée de la valeur de cette résistance. Or le poids employé pour le faire descendre ou monter doit être préalablement soustrait de la tension totale que la vapeur exerce sur le piston.

La perte de vapeur par le piston est une cause variable de la réduction que subit la puissance mécanique pendant son action. Elle est variable, non-seulement parce que le piston en laisse passer des quantités différentes, suivant le jeu plus ou moins libre qu'il prend dans le cylindre, à force de frotter en montant et en descendant; mais encore par l'espèce de vapeur que l'on met en action.

Lorsque le piston vient d'être regarni, resserré ou graissé, il contient assez bien pendant quelques heures de travail une vapeur de 100 à 110 degrés de température; mais après, cette vapeur se fait jour et se porte, en petites parties à la vérité, directement dans le condenseur où elle va affecter le vide et par conséquent la puissance mécanique. Cet effet toutefois n'est pas important, à ces degrés de température, si le piston et le cylindre sont d'une bonne construction.

Il n'en est pas de même à des températures plus élevées. Quelle que soit la construction de ces pièces, à 120 degrés et à plus forte raison au-dessus de ce terme, la vapeur passe au commencement comme dans le cours du travail, et dès lors la

perte qui en résulte est d'autant plus forte que la vapeur a plus de densité ; on s'est livré à bien des recherches, on a fait bien des dispositions de divers genres pour éviter cette perte ; tout cela a été jusqu'à présent sans succès.

Il faut donc se résigner à condenser tout à la fois et la vapeur *qui a servi*, et toute celle que le piston a *laissé passer;* ce qui exige une puissance de condensation plus considérable, et plus d'efforts pour faire le vide que dans les machines à basse pression.

Cependant il est bon de remarquer que le désavantage des machines à haute pression sur les autres n'est pas aussi considérable en ce qui concerne la perte de vapeur par le piston, lorsque la machine marche sans condenseur. On n'a toujours en opposition, quelle que soit cette perte, que la pression atmosphérique, et l'on n'emploie aucune portion de puissance pour faire le vide. Avec ces machines, sans condenseur, on consomme seulement plus de vapeur qu'il n'en faudrait pour faire le même travail, si le piston contenait la vapeur exactement ; mais avec un condenseur, outre qu'on perd de la vapeur, il faut encore dépenser de la force pour détruire toute la vapeur perdue.

On conçoit facilement, d'après ce que nous venons de dire, qu'il est impossible de donner une valeur applicable, en toutes circonstances, à la perte de force qui résulte de *l'action primordiale* de la vapeur sur le piston ; il faut nécessairement la déterminer dans chaque cas et pour chaque machine.

Cette détermination est assez facile pour les machines à condenseur, soit à basse, soit à haute pression.

Si le piston ne perdait pas, le condenseur ne recevrait que la quantité de vapeur qu'on a jugé nécessaire d'introduire dans le cylindre pour produire une pulsation ; s'il perd plus de vapeur

que ne l'exige le service de la machine, l'excès sera passé dans le condenseur. Or, comme on peut connaître la température et la quantité de vapeur employée, ainsi que la température et la quantité d'eau d'injection introduite à chaque coup, il est aisé, comme nous le verrons plus loin, de juger si l'eau provenant de la condensation est plus chaude qu'elle ne doit l'être dans le premier cas, et d'établir, d'après cet excès de chaleur, la perte de vapeur qui a eu lieu par le piston. On sait que cette eau de condensation n'est autre chose que le résultat du mélange de la vapeur à tel degré de température avec de l'eau froide à tel autre degré beaucoup plus bas.

Il ne faut pas perdre de vue que ce que nous venons de dire ne concerne que l'évaluation du rapport de la puissance d'une machine à l'effet utile produit. Lorsqu'on veut connaître tout simplement le degré de puissance dont on dispose, sans avoir égard à ce rapport, on se borne à déterminer le degré de tension qui règne habituellement dans le condenseur ; et quand on le voit augmenter, sans qu'il y ait de changement ni dans la température de la vapeur, ni dans les quantités d'eau injectée au même degré de froid, on peut être sûr que le piston ne contient plus convenablement la vapeur, et qu'il faut le regarnir ou le resserrer, en un mot y retoucher.

Quant aux machines sans condenseur, on n'a, ce nous semble, aucun moyen simple d'évaluer les pertes de vapeur, puisqu'elle se dissipe dans l'air. Pour cela il faudrait la condenser, et comparer la quantité d'eau qui en proviendrait avec la quantité de vapeur strictement nécessaire à chaque pulsation.

On peut néanmoins s'apercevoir si le piston laisse échapper de la vapeur, et s'il a besoin de réparation après avoir travaillé quelque temps; c'est lorsqu'avec la même température de

vapeur la machine montre moins de puissance que dans le premier jour de travail.

Enfin on voit par ce qui précède que cette première cause de réduction de la puissance mécanique de la vapeur est très-importante et inhérente à la nature même du mode d'application; il est probablement impossible de la faire disparaître complétement.

2°. Il est rare que le mouvement rectiligne du piston, qui s'élève et s'abaisse alternativement, convienne à l'exécution du travail que doit faire la machine; ce mouvement doit être transformé, et en effet il produit ordinairement d'abord le mouvement oscillatoire du balancier, et celui-ci ensuite le mouvement de rotation du volant, mouvement plus généralement applicable aux opérations mécaniques industrielles. Ce n'est que dans le second livre que nous apprendrons à apprécier en général ce que de pareilles transformations de mouvement peuvent faire perdre à la puissance mécanique. Ce que nous pouvons dire, quant à présent, c'est que l'étendue de la perte qu'elles occasionent dépend en assez grande partie de la construction et de la disposition des pièces qui donnent lieu à ces transformations; or comme cette construction et cette disposition de pièces peuvent varier pour chaque machine, fût-elle exécutée par le même ouvrier, on ne peut savoir que par des expériences spéciales avec chaque machine pour quelle part cette cause entre dans la réduction qu'il faut faire dans la puissance mécanique.

3°. On pourrait en dire autant du mécanisme servant à faire ouvrir et fermer les orifices du régulateur, et de la force qu'il faut employer pour faire manœuvrer les deux pompes, l'une destinée à alimenter la chaudière et l'autre à condenser la vapeur : il est vrai de dire néanmoins que si l'on fesait abstrac-

tion des frottemens occasionés par la manière de faire manœuvrer ces pompes, il serait facile d'évaluer la puissance qu'elle consomme, ainsi que nous le verrons dans le troisième volume. Mais cette cause de perte a une très-petite influence en comparaison des autres sur le rapport de la puissance à l'effet.

4°. La pompe à air dont il nous reste à parler influe beaucoup sur ce rapport.

Rappelons-nous qu'on ne parviendrait pas à avoir, dans le condenseur, le vide partiel qui convient à l'activité de la machine, si l'on n'épuisait point, à chaque instant, ce condenseur, de l'air mêlé avec la vapeur, et de l'eau de condensation qui s'y accumulerait très-rapidement.

C'est aux dépens de la puissance mécanique de la vapeur que la manœuvre de cette pompe à air s'exécute; et tout ce que celle-ci exige de force doit nécessairement venir en déduction de la puissance primitive. Si vous mettiez de côté les frottemens du piston de cette pompe et du mécanisme qui la fait mouvoir, il vous serait facile de trouver les bases d'après lesquelles vous devez évaluer la force qu'elle consomme.

Cette pompe a pour objet de faire le vide dans le condenseur et d'enlever l'eau de condensation : pour faire le vide, il faut qu'elle soulève toute la colonne atmosphérique qui répond à la surface de son piston, et son jeu présentera une réaction d'autant plus forte que ce piston aura plus de surface et de vitesse. Or cette réaction serait égale au poids de cette colonne atmosphérique, multipliée par la longueur de la course du piston, si celui-ci fesait un vide complet dans le condenseur; mais comme il y règne toujours un certain degré de tension, on n'a pas à tenir compte dans le calcul de tout le poids de l'atmosphère.

Il sera bon peut-être d'éclaircir ceci par un exemple : supposons que le piston ait un centimètre carré de surface et deux

centimètres de course qu'il parcourt en une seconde. Vous savez que le poids de l'atmosphère sur un centimètre carré de surface est, terme moyen, de 1 kil.,036; c'est donc 1 kil. 036 que vous devez élever par seconde à 2 centimètres de hauteur; c'est-à-dire que si vous fesiez le vide absolu dans le condenseur, par le jeu de ce piston, vous devriez défalquer, de la puissance primitive de la vapeur, 2 kil.,032 élevés à un centimètre en une seconde, produit de la multiplication du poids de l'atmosphère par 2 centimètres de course.

Mais s'il reste dans le condenseur une tension équivalente à un huitième d'atmosphère, par exemple, cette tension aidera le piston à vaincre la résistance atmosphérique, et la valeur de cete coopération viendra en déduction du poids absolu de l'air que vous aurez à soulever dans le cas ci-dessus : il est vrai de dire que si le mouvement de la pompe à air est favorisé par cette tension, le piston-moteur de la machine l'a constamment en opposition ; de sorte qu'il serait préférable de déduire, de la puissance mécanique, toute celle que peut consommer la pompe à air, sans avoir égard à la tension qui reste dans le condenseur.

Quant à l'effort qu'exige l'évacuation de l'eau de condensation par la pompe à air, il suffit, pour l'évaluer, de mesurer la quantité d'eau enlevée, dans l'unité de temps, et la hauteur à laquelle on la porte pour s'en débarrasser.

Rappelez-vous qu'on donne ordinairement au piston de cette pompe les *deux tiers* du diamètre du piston-moteur, et une course de moitié de longueur, ce qui donne au corps de pompe à air entre le quart et le cinquième de la capacité du grand cylindre de la machine, et vous trouverez que cette pompe à air doit opérer une réduction considérable dans la puissance de la machine.

Il résulte de ce qui précède que, pour trouver le rapport de l'effet utile produit par les machines à vapeur, avec la puissance mécanique dépensée, il faudrait connaître, 1°. la valeur des frottemens du piston ; 2°. la quantité de vapeur qui se perd entre le cylindre et ce piston; 3°. la valeur des frottemens et de la perte de force qui résulte des transformations de mouvement nécessaire au jeu et au travail de la machine ; 4°. la force que consomme le régulateur, la pompe alimentaire, la pompe à eau froide, avec tous les frottemens que leur manœuvre entraîne; 5°. enfin la quantité de puissance mécanique dépensée par la pompe à air, destinée principalement à établir sur les deux faces opposées du piston-moteur la plus grande inégalité de pression possible.

Or, comme la plupart de ces causes de perte de force sont variables, non-seulement par les diverses constructions adoptées pour transmettre au travail le mouvement du piston-moteur, mais encore par la manière dont les machines de la même espèce sont exécutées et entretenues, il suit qu'on ne peut apprécier rigoureusement le rapport de la puissance dépensée à l'effet produit, et en donner la valeur *à priori*.

Il faut donc, ainsi que nous l'avons dit au commencement de ce chapitre, déterminer le mouvement de la machine par une force connue, si vous voulez, par un poids appliqué au volant; et pour connaître la force *effective* de la vapeur, soustraire ce poids de la différence qu'il y a entre la pression qu'exerce la vapeur sur une surface du piston et celle qui lui est opposée sur l'autre surface : pour les machines sans condenseur, cette dernière pression est celle de l'atmosphère même, et pour les machines avec condenseur, celle qui règne dans ce vase.

Les détails dans lesquels nous venons d'entrer sur ce qui concerne les bases de l'évaluation des machines à vapeur, dans

le cas où celle-ci agit sur le piston, avec son *maximum* de tension, tant que dure la course, suffisent amplement pour apprécier la force de ces machines. Nous avons maintenant à rechercher ces mêmes bases pour l'action de la vapeur par expansion.

Il y a trois manières de faire agir la vapeur par expansion; savoir : 1°. en ouvrant une communication telle, entre la chaudière ou le réservoir à vapeur, et le cylindre, que le filet de vapeur, en se précipitant dans celui-ci, n'est pas assez considérable pour saturer l'espace que le piston laisse après lui en se mouvant; la vapeur agit alors par expansion, et sa pression sur le piston est inférieure, tant que dure la course, à celle qu'elle a dans la chaudière; 2°. en fermant la communication entre la chaudière et le cylindre, avant que le piston ait achevé sa course : la vapeur agit d'abord avec toute sa force de tension, et lorsque la communication est fermée, elle fait achever la course par sa force d'expansion; 3°. enfin, en dirigeant la vapeur qui vient d'exercer son action sur une des surfaces du piston, dans un autre cylindre plus grand, où elle agit une seconde fois, et par expansion.

La différence qu'il y a entre le premier cas que nous venons de poser, et celui que nous avons examiné plus haut, consiste seulement en ce que, dans l'un, la vapeur n'agit pas sur le piston, avec la force de tension qui règne dans la chaudière, mais avec une force d'autant plus faible que la vapeur prend plus d'expansion, à raison de la petite quantité qui en passe en un temps donné, et de la grandeur de l'espace que lui offre le cylindre dans ce même temps. Dans l'autre, la tension qui agit sur le piston est la même que celle qui règne dans la chaudière; et dans les deux cas l'action est constante tant que dure la course.

Le mode d'évaluation est donc le même dans ces deux cas;

seulement il ne faudra plus s'en rapporter pour celui de l'expansion au thermomètre de la chaudière, pour évaluer la tension sur le piston ; il sera nécessaire de déterminer préalablement la quantité de vapeur, en poids, qu'on laisse sortir de la chaudière, dans l'unité de temps, et de comparer l'espace qu'elle doit occuper dans ce même temps, avec celui qu'elle occuperait si elle saturait l'espace, si elle n'avait rien perdu de la densité qu'elle avait dans la chaudière : par exemple, que la vapeur ait dans la chaudière deux atmosphères de pression ; un kilogramme de cette vapeur occuperait, en le saturant, un espace d'à peu près 850 décimètres cubes ; mais que par la manière de la faire arriver dans le cylindre, cette quantité de vapeur trouve à occuper un espace de 1700 décimètres cubes, la tension sur le piston ne sera plus que d'une atmosphère ; et elle agira par expansion.

Lorsque la vapeur de la chaudière reste en communication avec le cylindre tant que dure la course du piston, soit qu'elle y conserve toute sa densité, soit qu'elle y prenne de l'expansion, comme nous venons de le supposer, il est certain qu'après l'action cette vapeur jouira encore du même degré de tension qu'elle avait auparavant, dans l'hypothèse toutefois que la température n'a subi aucune altération.

Si donc on condense cette vapeur, ou qu'on l'envoie dans l'air, on perd une force réelle d'autant plus grande qu'on travaille à une plus haute température. Bien que cette vapeur perdue ait encore sa tension primitive, il ne faut pas croire cependant qu'elle soit capable de produire un second effet mécanique égal au premier : elle agirait comme un ressort qui se détend et dont la force s'affaiblit graduellement; tandis que, dans la première action, ce ressort est entretenu dans le même état de compression, par la vapeur nouvelle qui vient le maintenir.

Néanmoins, il y a toujours un avantage incontestable à profiter de cette force décroissante de la vapeur, et c'est ce qu'on se propose en fermant la communication entre la chaudière et le cylindre, lorsque le piston a parcouru une portion quelconque de sa course, ainsi que nous l'avons établi plus haut. Mais dans ce cas, comment évaluer la puissance mécanique de la vapeur? Supposons qu'on se serve de vapeur à deux atmosphères de pression, et qu'à l'arrivée du piston au milieu de sa course la communication soit fermée : à ce point, le piston, animé d'une vitesse qui dépend et de la tension ci-dessus et du degré de résistance que le travail lui oppose, continue de fuir devant la vapeur, qui prend incontinent de l'expansion; mais comme la force de celle-ci décroît, la vitesse du piston doit décroître aussi graduellement jusqu'au bout de sa course. Or, ici, la tension de la vapeur, occupant un espace double, n'est plus que moitié de la tension primitive, c'est-à-dire qu'elle n'est plus que d'une atmosphère, lorsque le piston a achevé sa course.

Mais il faut remarquer que, pour arriver là, la vapeur a passé successsivement par tous les degrés de force intermédiaires entre deux atmosphères et une atmosphère de tension. Il faudrait donc, pour évaluer la puissance, tenir compte de la somme de toutes ces actions décroissantes; c'est ainsi du moins que l'a proposé Watt, à qui nous devons le tableau suivant, concernant la manière d'évaluer l'expansion.

Il suppose que la longueur de la course est divisée en 20 *parties égales*, et qu'on cesse d'introduire de la vapeur lorsque le piston est arrivé au quart de sa course; il admet en outre que la force de la vapeur décroît suivant la loi de Mariotte, c'est-à-dire que cette force est en raison inverse du volume que prend la vapeur par expansion.

	DIVISION de la longueur de la course en vingt parties.		RAPPORT de la pression de la vapeur sur le piston, avec sa pression primitive, représentée par l'unité.	
	0,05	Fourniture complète de vapeur de la chaudière au cylindre.	1	Pression primitive de la vapeur avant l'expansion.
	0,1		1	
	0,15		1	
	0,2		1	
Quart de la course	0,25		1	
	0,3	La communication avec la chaudière est interceptée et la vapeur n'agit plus que par expansion.	0,83	
	0,35		0,719	
	0,4		0,625	
	0,45		0,556	Moitié de la pression primitive.
Moitié de la course	0,5		0,5	
	0,55		0,454	
	0,6		0,417	
	0,65		0,385	
	0,7		0,357	Tiers de la pression primitive.
Les trois quarts de la course.	0,75		0,333	
	0,8		0,312	
	0,85		0,294	
	0,9		0,278	
	0,95		0,263	Quart de la pression primitive.
Course totale . .	1,		0,25	
		Somme des actions	11,573	

En additionnant les divers nombres de la colonne qui représentent les diverses actions, ou, si l'on veut, les divers degrés de pression de la vapeur sur le piston, à chaque partie de la course, on trouve pour somme totale 11,573. Si la vapeur, dont l'action est ici représentée par l'unité, avait été fournie pendant toute la durée de la course, il y aurait eu 20 actions dont chacune aurait été équivalente à 1; la force aurait donc été égale à 20. Quand elle n'est fournie que jusqu'au quart de la course, la force n'est que 11,573, au lieu de 20; mais aussi on n'a employé que le quart de la quantité de vapeur qu'on eût consommée dans le premier cas, c'est-à-dire sans expansion; et cependant on a obtenu plus de la moitié de la force, puisque 11,573 est envi-

ron les [illegible]/100 de cette force. Il est bon d'observer toutefois que la course ne s'achève pas dans le même temps, et qu'elle est retardée.

Les bases d'après lesquelles il semble qu'on pourrait évaluer la force d'action de la vapeur, lorsqu'elle se détend dans un seul cylindre, pourraît peut-être servir aussi dans le cas où l'on fait agir une seconde fois la vapeur par expansion, dans un second cylindre ; il ne faut pas se dissimuler néanmoins que s'il est, sinon impossible, du moins oiseux, dans l'état actuel des choses, de vouloir calculer, *à priori*, la puissance mécanique *effective* d'une machine à vapeur, sans expansion, il l'est bien plus encore pour une machine à expansion, à un ou plusieurs cylindres ; et tout ce que nous avons dit des premières à ce sujet, s'applique, à bien plus forte raison aux dernières. Il faut se résoudre, quant à présent, à ne juger leur puissance que par le travail particulier que chacune fait, et sans prétendre encore conclure de l'une à l'autre avec quelque exactitude.

Dans les premiers chapitres relatifs au moteur qui nous occupe, il a été question d'une espèce de machine à vapeur qui diffère essentiellement de celles qui précèdent ; nous voulons parler de la *machine atmosphérique*. Rappelons-nous qu'avec cette dernière, la vapeur n'est pas le moteur immédiat ; elle ne sert qu'à faire le vide. C'est la pression de l'air qui fait la force de cette machine. Le mode d'évaluer cette force doit donc différer aussi de celui qui convient aux machines mises en mouvement par la seule pression de la vapeur.

En effet, que résulte-t-il ici du vide qu'a produit la vapeur sous le piston ? le soulèvement d'une colonne atmosphérique, d'une base égale à la surface du piston, à une hauteur précisément égale à la longueur de la course du piston. Mais quelle est dès lors la force agissante, la puissance mécanique ? Le poids

de cette colonne, multiplié par la longueur de la course si le vide est parfait. Cette puissance mécanique est donc d'autant plus considérable que le piston a plus de surface, qu'il a plus de course à faire sous l'action de l'air, et que le vide opéré par la condensation de la vapeur est plus parfait.

Si le vide est parfait, le poids de la colonne atmosphérique motrice est, terme moyen, équivalent à celui d'une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur, ou, si l'on veut, ce poids serait représenté par $1^{kil},036$ multiplié par le nombre de centimètres carrés dont se compose la surface du piston.

Si le vide n'était que partiel, il faudrait soustraire le poids correspondant à la tension offerte dans le condenseur, du poids de l'atmosphère par centimètre carré, et multiplier la différence par la surface du piston, exprimée aussi, comme ci-dessus, en centimètres carrés.

Ainsi, par exemple, supposons une machine dont le piston ait 2000 centimètres carrés de surface; que sa course soit de 200 centimètres de hauteur; que la tension régnant constamment dans le condenseur soit équivalente à 36 *grammes* par centimètre carré : la pression effective de l'atmosphère ne sera plus, sur l'unité de surface, que $1^{kil},000$; multipliez ce dernier nombre par 2000, surface entière du piston, vous aurez, pour le poids de la colonne atmosphérique 2000 kilogrammes; et pour puissance mécanique 2000 × 200 centimètres de course, ou 400000 kilogrammes élevés à un centimètre de hauteur; ou, en d'autres termes, cette puissance sera équivalente à un poids de 2000 kilogrammes tombant de 200 centimètres de hauteur.

Mais, qu'on prenne la première ou la seconde expression, quel sera le temps de l'action? Ce temps dépend évidemment de la charge de la machine : si elle était nulle, si la colonne d'air ne trouvait aucune résistance, la vitesse du piston se détermi-

nerait d'après les lois de la chute libre d'un corps grave; avec une charge, elle doit être déterminée d'après les mêmes lois, mais en considérant que le poids moteur soulève, par sa chute, un autre poids qui lui est opposé.

Du reste, il en est de la machine atmosphérique comme des autres machines à vapeur; il faut comprendre, dans la charge, toutes les résistances occasionées par les divers accessoires qui sont nécessaires au jeu de cette machine.

Si l'on réfléchit sur tout ce que nous venons de dire, concernant les bases sur lesquelles on peut raisonnablement asseoir l'évaluation de la puissance effective des divers systèmes de machines à vapeur, on trouvera qu'il n'y a de généralement applicable que ce que nous avons appris sur la tension de la vapeur, sur son action, à divers degrés de vitesse, sur sa force expansive, enfin que ce qui est relatif à l'effet du vide et de la condensation, sur la puissance mécanique. Nous avons reconnu la force de tension, d'expansion, quel qu'en soit le mode d'application; il ne nous reste donc, pour compléter les seuls faits généraux que ce sujet nous présente, qu'à exposer ceux qui ont rapport à la manière de juger, dans tous les cas, de l'état du vide opéré par la condensation, et de la quantité d'eau nécessaire à cette condensation, en toutes circonstances.

Supposons que v soit la quantité de vapeur à condenser, par chaque coup de piston (nous exprimons cette quantité en pieds cubes, pour plus de simplicité).

e, La température de l'eau froide d'injection, en degrés centigrades.

f, La température de l'eau, produite par la condensation.

560, ou si l'on veut, 600, pour le nombre d'unités de chaleur qui affecte la vapeur à 100 degrés de température.

Qu'enfin x soit le nombre de *pouces cubes* d'eau froide né-

cessaire pour condenser la quantité v de vapeur. On sait que le *pouce* cube d'eau pèse à très-peu près un *pied cube* de vapeur.

Nous aurons $v \times (560 - f) = x \times (f - e)$; donc $x = v \times \frac{560 - f}{f - e}$.

Si donc il arrive dans le condenseur 2 *pieds* cubes de vapeur à 100 degrés; que l'eau d'injection soit à 10 degrés de température, et qu'on veuille abaisser l'eau de condensation jusqu'à 40 degrés, afin de n'avoir qu'un faible reste de tension dans le condenseur, nous dirons, pour trouver d'après la formule ci-dessus la quantité de *pouces* cubes d'eau qu'il faut employer, $x = 2 \times \frac{560 - 40}{40 - 10}$, ou $x = \frac{1040}{30} = 34 \frac{2}{3}$ *pouces* cubes d'eau froide.

On conçoit que, connaissant la quantité d'eau froide injectée, on peut fort aisément trouver, au moyen de cette formule, la température qu'aurait l'eau de condensation. Il en est de même pour chacune des quantités qui entrent dans cette formule.

Malgré les faits exacts relatifs et à la force de tension de la vapeur, et aux résultats de la condensation, à toutes les températures, faits qui s'appliquent aux machines à vapeur quelconques, nous ne pouvons pas terminer, sans répéter ce que nous avons dit plus haut, que, vu l'influence de diverses circonstances extrêmement variables et quelquefois accidentelles dont on ne peut débarrasser la construction de ces machines, il paraît impossible, dans l'état actuel de nos connaissances, d'évaluer, *à priori*, le rapport de la puissance mécanique à l'effet produit : on peut dire cependant, d'après l'observation d'un grand nombre de faits, que cette puissance est, en général, à l'effet produit par les machines d'une bonne construction et en bon état, dans le rapport de 3 à 2.

CHAPITRE XLIX.

Des qualités relatives des principaux systèmes de machines à vapeur.

Il y a trop de différences entre les principaux systèmes de machines à vapeur, actuellement en usage, et trop de nuances d'opinion sur les qualités relatives de chacune, pour négliger de porter notre attention sur ce sujet, et de chercher à reconnaître, si, parmi ces divers systèmes, il en est un qui soit préférable à tous les autres, en toutes circonstances, ou bien si chaque système a un mérite relatif, qui doive le faire préférer dans certains cas particuliers.

Rappelons-nous que les machines construites suivant ces différens systèmes sont connues sous les dénominations suivantes : 1°. machines à basse pression : à simple effet, machines dites atmosphériques; à double effet, sous divers modes de condensation; 2°. machines à moyenne pression, avec ou sans condenseur, à simple ou à double effet; 3°. machines à haute pression et à expansion, avec ou sans condenseur, à simple ou à double effet, et à un seul cylindre; 4° enfin machines à expansion, avec plusieurs cylindres.

On peut examiner les qualités relatives de ces diverses espèces de machines, sous trois points de vue distincts, savoir : 1°. sous le point de vue de l'économie de la force, ou, en d'autres termes, sous celui des dépenses à faire pour en produire une quantité déterminée; 2°. sous celui de la sûreté ou des dangers de

l'emploi de ces machines; 3°. enfin sous le point de vue de la construction, eu égard à la simplicité et aux prix de cette construction.

Il est certain que le système le plus avantageux, sous le premier rapport, est celui qui, comparé aux autres, dans les mêmes conditions, produit le plus grand effet mécanique, avec la plus petite quantité de combustible. Mais il est nécessaire, avant d'établir de comparaison, d'admettre la supposition que l'appareil à vapeur et la machine proprement dite sont également bien construits, pour le service de chaque système. Car nous savons quelle grande influence une mauvaise construction d'appareil et de machine peut exercer sur l'effet mécanique d'un système quelconque : d'ailleurs, pour comparer deux choses, il faut les mettre dans les mêmes conditions, sans quoi elles ne seraient point comparables.

Si donc nous considérons les machines à basse et à haute pression sous le rapport économique, nous trouvons dans les opinions beaucoup de divergence : les unes sont favorables à la haute pression; les autres y sont contraires, et, selon d'autres encore, il est indifférent, sous le rapport ci-dessus, d'employer la basse ou la haute pression; on en obtient, dit-on, les mêmes résultats mécaniques.

Une des raisons principales, apportées par ceux qui ont jusqu'à présent combattu en faveur des machines à haute pression, semble être évidemment une erreur de fait : ils ont prétendu que, pour porter, par exemple, la tension de la vapeur à 10 atmosphères, on était loin de consommer une quantité de calorique dix fois plus grande que pour la porter à une atmosphère, et que dès lors il devait y avoir une économie réelle de combustible, puisqu'avec une faible addition de chaleur, en apparence, on faisait croître rapidement la force de la vapeur.

Cette prétention n'est pas soutenable ; ainsi que nous l'avons vu plus haut; et on se rappellera qu'à tous les degrés de température, un poids donné de vapeur doit contenir la même dose de calorique et d'eau.

On ne peut disconvenir que si les partisans des machines à haute pression n'avaient d'autres raisons à donner que celle-là, ils se défendraient mal contre les personnes qui contestent les avantages économiques de ces machines. Ceux-ci prétendent à leur tour, d'abord, qu'il n'est pas suffisamment prouvé qu'elles produisent plus, avec moins de combustible que les autres; qu'on est trompé sur leur force effective, par la manière vague de l'exprimer; qu'une machine, dite de 20 chevaux, peut n'être qu'une machine de 16; ensuite qu'un kilogramme de vapeur à une atmosphère ou à 10 n'est capable dans les deux cas que du même effet mécanique, ayant dans le premier un volume dix fois plus grand que dans le second, sous la pression atmosphérique, et dans tous les deux, les mêmes proportions d'élémens constitutifs de la force; et que, comme il est impossible de contenir, par le piston, la vapeur à haute pression, il s'en fait une perte tellement considérable qu'il doit être plus avantageux de ne se servir que de vapeur dite à basse pression; enfin qu'on peut aussi bien profiter de l'expansion de la vapeur, à quelques degrés au-dessus de l'ébullition qu'à 200 degrés, et qu'il est au moins indifférent d'introduire dans le cylindre un volume de vapeur à une atmosphère, ou un dixième de ce volume à 10 atmosphères, pour le laisser s'y développer, puisque les quantités de vapeur sont les mêmes, la vapeur étant dans un cas dix fois plus dense que dans l'autre.

Il faut avouer qu'il est indifférent, eu égard aux quantités de vapeur dépensées, d'en employer d'une force dix fois plus grande sur *une unité* de surface de piston, ou d'en employer

d'une force dix fois plus petite sur *dix unités* de surface de piston; il l'est de même eu égard à la quantité de combustible dépensée dans le même fourneau.

L'argument principal, en faveur des machines à haute pression, sous le rapport économique n'était donc pas fondé, et la question semblait devoir rester indécise, si quelques faits nouveaux, que nous ont fournis nos propres expériences, ne venaient aujourd'hui éclaircir cette question et montrer ce qui se passe, lorsque de la vapeur à basse ou à haute pression imprime le mouvement au point d'application du moteur.

Nous avons vu que pour imprimer la même vitesse au piston, il fallait diminuer d'une aussi grande quantité la charge d'équilibre d'une vapeur à basse pression, que d'une vapeur à haute pression : or cette diminution, toujours la même pour toutes les températures, influe bien plus sur une tension faible que sur une tension forte; il semble donc permis de conclure, de ce fait seul, que, pour obtenir la même puissance mécanique, il faut dépenser moins de combustible avec une machine à haute pression qu'avec une machine à basse, ou à moyenne pression, et que, considérées sous le point de vue de l'économie du combustible, les premières sont préférables à toutes les autres. A la vérité, les pistons de celles-là, malgré les soins qu'on en prend, laissent échapper beaucoup plus de vapeur que celles-ci; mais cette perte est bien loin de balancer les avantages économiques de la haute pression, quelle que soit l'espèce de machine à laquelle on veuille l'adapter.

Ainsi, que ce soit à simple ou à double effet, avec condenseur, ou sans condenseur, par expansion dans un seul cylindre ou dans plusieurs, on peut toujours obtenir, de l'action de la vapeur à une haute température, plus de puissance mécanique, avec une quantité donnée de combustible, brûlée dans le même

fourneau, qu'à une température moins élevée; les vitesses étant d'ailleurs égales de part et d'autre.

Quant à la comparaison qu'on pourrait faire, sous notre premier point de vue, des diverses espèces de machines à haute pression que nous avons rappelées plus haut, il nous paraît au moins douteux qu'on pût raisonnablement établir quelque suprématie entre ces espèces : il nous manque encore trop d'observations sur ce sujet important; on remarquerait cependant qu'en général on ne doit employer de condenseur pour ce genre de machines que dans les lieux où l'on peut se procurer en abondance de l'eau froide pour la condensation, et lorsqu'on peut compter non-seulement sur une grande perfection d'exécution, mais encore sur une grande vigilance de soins et d'entretien. Sans cela, il est préférable de perdre la vapeur dans l'air, et de sacrifier l'équivalent d'une atmosphère; sacrifice, au reste, assez facile à réparer, en élevant de quelques degrés la température de la chaudière.

Si maintenant nous examinons les divers systèmes de machines à vapeur sous le second point de vue, c'est-à-dire sous celui du plus ou moins de dangers que chacun d'eux peut présenter, nous avons à entrer dans des considérations d'une autre nature; et s'il était prouvé, d'une manière absolue, qu'en toutes circonstances les machines à haute pression présentent des dangers que les autres ne présentent point, il faudrait assurément renoncer à leur emploi, et se résoudre à payer un peu plus cher la puissance mécanique de la vapeur.

Hâtons-nous de dire que nous n'étendons pas la limite de la haute pression au delà de 8 atmosphères : à ce degré de tension, on contient déjà assez mal la vapeur; que serait-ce à un degré plus élevé? et comme en peu de temps une vapeur si active altérerait les pièces principales de la machine! D'ailleurs au-des-

sus de 8 atmosphères, un faible accroissement de température augmente considérablement la tension de la vapeur; et qui oserait répondre des mesures prises pour maîtriser la violence inopinée de ce terrible agent?

Nous croyons déjà accorder beaucoup en prenant la limite de 8 atmosphères de pression, degré de pression qu'en général nous ne conseillons guère sinon d'employer, au moins de surpasser.

Voyons cependant si, à ce degré, il y a des dangers qui ne puissent exister pour la basse pression.

Chaque *pouce* carré de surface des enveloppes qui contiennent la vapeur à basse pression, éprouve, de la part de celle-ci, un effort équivalent à 17 ou 18 *livres*; mais comme l'air atmosphérique presse aussi au dehors avec une force de 15 *livres* par *pouce*, il suit que la vapeur tend à repousser l'enveloppe avec un effort réel de 2 à 3 *livres* par *pouce* carré.

A huit atmosphères, ce dernier effort sur chaque *pouce* carré de l'enveloppe est de 105 *livres*, c'est-à-dire que pour maintenir une soupape d'un *pouce* carré de surface contre cette vapeur, il faudrait charger la soupape d'un poids de 105 *livres*.

Pour se prémunir contre les dangers de l'explosion, il est nécessaire dans les deux cas, de donner aux chaudières et aux cylindres respectifs, une solidité telle qu'ils puissent résister à une pression au moins trois ou quatre fois plus grande que la pression totale de la vapeur que contiennent ces enveloppes.

Cela étant, supposons que, par quelque accident, la température des chaudières à basse et à haute pression, soit portée à un tel point que la force de la vapeur devienne supérieure à la pression à laquelle on a proportionné la solidité de chaque chaudière; il est évident que les deux chaudières pourraient crever

toutes deux si elles sont d'un métal malléable, ou éclater si elles sont en fonte de fer; le danger est donc commun à la basse comme à la haute pression; on pourrait dire même qu'il est plus imminent pour la basse pression, parce que la chaudière étant proportionnellement plus grande, elle est moins en état de résister à un excès de pression considérable. Quoi qu'il en soit, il n'y a pas plus de raisons de craindre un système que l'autre, lorsqu'on a proportionné la solidité des enveloppes à la force qu'elles doivent contenir.

Mais, par l'usage, par l'action continuelle du feu, les chaudières se détériorent et perdent de leur solidité; n'y a-t-il pas, dans ce cas, plus de dangers réels avec les machines à haute qu'à basse pression? nous ne le pensons pas. Les chaudières, dans les deux cas, doivent s'user de la même manière, on ne conçoit pas qu'il puisse en être autrement. Si donc on suppose que la force donnée aux chaudières à basse et à haute pression soit dans le rapport de 4 à 1 avec la tension de la vapeur qu'on veut employer, et qu'au bout d'un certain temps la force des chaudières soit affaiblie d'un quart, l'une et l'autre résisteront, non plus dans le rapport de 4 à 1, mais de 3 à 1, et toutes les chances restent les mêmes pour les deux genres de machines; poussez plus loin l'affaiblissement des chaudières par l'usure, les chances sont encore égales de part et d'autre.

On pourrait comparer la construction de ces chaudières avec celle des ponts; on proportionne leur solidité à la charge qu'ils auront à soutenir: on ne construit pas un pont destiné seulement au passage des gens de pied, comme celui qu'on destine au passage des voitures. Ils ne présentent pas plus de dangers l'un que l'autre, si on leur a donné la solidité relative convenable; et on apportera plus de soin à l'établissement d'un pont exposé aux secousses produites par le roulement de lourdes voitures qu'à

un pont pour les gens de pied; c'est ce qui doit être aussi pour la construction des chaudières à haute pression.

Au reste, ce n'est pas toujours parce que le feu est poussé outre mesure, ou parce que les soupapes de sûreté ne jouent point, ou même parce qu'on aurait mis la machine au repos, tout en continuant le feu, comme cela est déjà arrivé, qu'une chaudière est en danger; c'est encore lorsque le fond venant à rougir, parce qu'on a négligé l'alimentation, on introduit brusquement de l'eau : il se produit alors une si grande quantité de vapeur en peu d'instans, que l'ouverture des soupapes ne suffit point pour l'évacuer, et affaiblir l'excès de tension que la vapeur a pris, pour ainsi dire, subitement. Or, dans cette dernière circonstance, la chaudière d'un système, comme celle de l'autre, courent un danger égal; peut-être même serait-il plus grand pour la chaudière à basse pression.

Il semble donc résulter des raisonnemens ci-dessus qu'une chaudière destinée à produire une vapeur à huit atmosphères de pression, ne présente ni plus de dangers ni d'autres dangers qu'une chaudière à basse pression, et que toutes les deux peuvent ne pas en présenter, si l'on prend, dans la construction et les dispositions de ces chaudières, toutes les précautions que la prudence commande, et si le service de la machine est surveillé aussi scrupuleusement qu'il doit l'être.

Mais, dira-t-on, qui oserait se fier à des raisonnemens lorsqu'il s'agit de mettre en danger la vie des hommes? Peut-on compter sur les précautions connues? seront-elles suffisantes pour maîtriser cette force dans cette foule de circonstances qui pourront survenir, dans l'emploi qu'on en fait à divers services? Pour répondre, il faut changer la nature de la question que nous traitons; elle devient, comme elle doit l'être, une question

de fait; elle est ramenée sur son véritable terrain, et c'est là qu'il faut la prendre.

Pour ne pas prolonger la discussion sur ce point, et ne pas revenir sur ce que nous avons déjà dit, nous nous bornerons à rapporter une suite de faits que personne ne peut contester.

1°. Il existe, tant en Europe qu'aux États-Unis, un grand nombre de machines à haute pression, qui sont en activité constante depuis fort long-temps; elles travaillent en général à une pression de 3 atmosphères jusqu'à 12.

2°. Depuis deux siècles peut-être qu'il est question de machines à vapeur, et depuis près de cinquante ans que leur emploi s'est rapidement multiplié, il y a déjà eu, de loin en loin, quelques accidens; des chaudières ont crevé, mais on peut affirmer que, pendant ce laps de temps, il y a eu beaucoup plus d'accidens de voiture, que d'accidens occasionés par des machines à vapeur.

3°. Les machines à basse pression sont au moins pour moitié dans la proportion des accidens survenus aux machines à vapeur.

4°. Enfin il est toujours résulté des recherches faites pour constater les causes d'explosion, que si l'on avait pris les précautions requises et bien connues; que si l'on avait surveillé convenablement le service et l'entretien de la machine, il n'y aurait pas eu d'explosion; que celle-ci a toujours été la suite, ou de quelques défauts dans la construction et dans l'état actuel de la chaudière, ou d'une charge excessive qu'on avait posée sur la soupape de sûreté, ou d'une négligence dans le service soit du feu, soit de l'alimentation de la chaudière, soit de la machine même. En aucun cas, on n'a été fondé à dire, après l'examen scrupuleux des faits ainsi que des circonstances de l'explosion, que rien ne manquait à la machine, ni pour la solidité des pièces

qui entrent dans sa composition, ni pour les soins et la surveillance qu'elle pouvait exiger ; cependant, pour se faire un argument des accidens survenus à ces machines, et pour combattre, sous ce rapport, le système à haute pression, il faudrait prouver que quelques précautions, quelques soins qu'on ait pris, quelque bonne qu'ait été la construction dans toutes ses parties, on n'a pu maîtriser la vapeur, et que l'explosion a eu nécessairement lieu.

Puis donc qu'il n'en est pas ainsi, il est suffisamment prouvé et par le raisonnement et par les faits que les machines à haute pression ne présentent point des dangers qui ne soient point à redouter dans le service des machines à basse pression, et qu'en envisageant les premières sous ce point de vue, on ne trouve rien qui doive affaiblir les avantages économiques qu'elles ont sur les autres.

Il nous reste maintenant à examiner les qualités relatives des machines à vapeur, sous le troisième point de vue indiqué plus haut, celui de leur construction, et du nombre de pièces qui doivent entrer nécessairement dans chaque système.

En comparant sous ce point de vue les divers systèmes, il se présente d'abord une distinction fondamentale à faire entre eux : c'est qu'avec les machines atmosphériques et avec les autres machines à basse pression, on ne peut pas se passer de condenseur et de pompe à air, la puissance et le jeu de ces machines dépendant essentiellement du vide opéré par la condensation. Dans les machines à moyenne et à haute pression, ce vide n'est qu'un auxiliaire utile ; et comme il n'est pas indispensable, et que ces machines peuvent très-bien fonctionner sans condenseur, on conçoit la possibilité de donner à leur construction un degré de simplicité auquel il n'est pas permis de porter les autres. Les machines à haute pression nous offrent donc encore sous ce

rapport un avantage nouveau, et l'on peut dire qu'il reste à savoir si, lorsque, sacrifiant cet avantage, on fait entrer dans la composition d'une machine à moyenne et à haute pression, un condenseur et ses accessoires, on obtient, en surcroît de puissance mécanique, ce que l'on a perdu en simplicité, et par conséquent en économie de construction.

Pour pouvoir décider cette question d'une manière satisfaisante, il faudrait qu'on eût fait travailler une de ces machines avec et sans condensation, et qu'on eût tenu une note exacte et du travail fait, et de la quantité de combustible dépensée pour ce travail dans les deux cas.

Cet essai décisif n'a point été tenté, que nous sachions, et nous ne croyons pas pouvoir émettre une opinion fondée sur un sujet que tant de circonstances indépendantes des qualités de la vapeur viennent compliquer, et qu'on ne doit traiter qu'avec le secours de bonnes observations et d'expériences directes sur le travail des machines.

Les machines à moyenne et à haute pression, avec un seul cylindre, sont donc tout aussi compliquées que celles à basse pression, lorsqu'elles ont un condenseur. Elles sont plus compliquées et plus chères de construction, lorsqu'elles sont composées de deux ou trois cylindres, comme celles dont il a été fait mention dans les premiers chapitres, et dont on voit les figures dans l'atlas. Ce dernier système aurait besoin d'être comparé, comme nous le disions ci-dessus, avec des machines à expansion et à un seul cylindre, pour pouvoir être jugé, ainsi que pour apprécier le degré d'avantage qu'on achète par l'adjonction dispendieuse d'un ou de deux cylindres supplémentaires, et par une plus grande quantité de frottemens occasionés par les pistons.

Il résulte de ce que nous venons de dire que les machines ne

sont point nécessairement plus compliquées, parce qu'elles sont à haute pression; mais qu'au contraire, elles peuvent l'être moins et exiger moins de frais de construction.

Enfin, quant à la comparaison qu'on peut faire des machines du même système, on trouvera que leurs qualités relatives dépendent entièrement de l'habileté avec laquelle elles ont été respectivement construites; et si l'on se rappelle ce que nous avons dit au sujet du rapport de la puissance dépensée à l'effet produit, on concevra combien la construction peut établir de différence entre les machines de la même espèce.

Il serait permis de dire même, que les soins, l'exactitude, la simplicité de composition apportés dans la construction peuvent être tels, qu'ils balanceraient pour une machine à basse pression, les avantages importans qui résultent des propriétés de la vapeur employée à haute pression, si la machine de ce dernier système était mal conçue et médiocrement exécutée.

CHAPITRE L.

Coup d'œil historique sur les machines à vapeur.

Nous sommes arrivés au terme de nos observations sur la vapeur comme force motrice; nous nous sommes efforcés de faire bien connaître un moteur déjà d'une si éminente importance, et dont l'influence qu'il est appelé désormais à exercer sur les affaires industrielles des peuples, ne peut encore être appréciée dans toute son étendue.

Nous ne pensons pas avoir rien omis d'essentiel sur ce sujet; il nous serait peut-être permis de croire même que nous le laissons plus avancé que nous ne l'avons pris. Nous ne nous dissimulons pas néanmoins qu'il reste encore beaucoup à faire, et que ce moteur est susceptible de recevoir de grandes améliorations, par la propagation même de son usage : les faits naîtront en foule des observations fondées sur une connaissance exacte de ses propriétés; c'est à ceux qui emploient les machines à vapeur qu'il doit appartenir de les faire bien étudier et de montrer comment on pourra les améliorer.

Dans le cours de nos observations sur ce moteur, nous n'avons pas parlé de ceux à qui nous le devons; et certes il y aurait une sorte d'ingratitude à finir ce sujet sans citer leurs noms et sans rendre hommage à des hommes qui occupent une si belle place dans les annales de la mécanique industrielle; et quoique bien d'autres avant nous aient rempli cette tâche en écrivant l'histoire des machines à vapeur, nous ne pouvons pas cependant nous dispenser d'en donner une légère esquisse, en acquittant un devoir.

La forme la plus commune, la plus habituelle en quelque sorte, sous laquelle la vapeur apparaît comme une force, est celle qu'elle affecte lorsqu'elle sort d'un vase en ébullition, par un orifice étroit. C'est aussi ce phénomène qui semble avoir donné à Brancas, physicien italien, la première idée qu'on ait conçue d'employer la vapeur comme force motrice. Il en proposa l'application, vers l'an 1628, à une espèce de roue à aubes qu'un courant de vapeur mettait en mouvement.

Ce mode était assurément impraticable en grand, avec économie; et si dès lors les arts ne purent tirer aucun avantage du plan de Brancas, on ne peut se dispenser de reconnaître qu'il a révélé le premier l'existence d'une force nouvelle qui joue

aujourd'hui un si grand rôle dans les travaux de l'industrie.

Environs 30 ans après, et très-probablement sans connaître ce que Brancas avait fait, le marquis de Worcester conçut, de son côté, l'idée de cette force, et la signala dans un petit ouvrage intitulé : *Centurie d'inventions*, comme un moyen puissant d'élever l'eau par la seule action de la vapeur sur ce liquide.

Malgré le ton énigmatique dont Worcester s'était servi, les imaginations fermentèrent en Angleterre surtout ; et la possibilité d'employer utilement cette force acquit plus de réalité, par le mode spécial d'application indiqué par l'auteur de la Centurie d'inventions.

Aussi, dès 1683, l'Anglais Morland proposa à Louis XIV d'élever l'eau par la vapeur; et dans ce qu'il publia à ce sujet, il montra des connaissances assez précises sur le volume que prend une certaine quantité d'eau réduite en vapeur; il l'évaluait à 2000 fois celui du liquide. Il paraît, en outre, que l'appareil à élever l'eau, par l'action de la vapeur, devait déjà lui être bien connu, puisqu'il dressa des tables des quantités d'eau qu'on pouvait élever avec cette force, ainsi que des meilleures dimensions à donner aux diverses pièces de cet appareil.

Néanmoins, Morland paraît n'avoir employé que le principe d'action, qui résulte de la tension de la vapeur, et que Worcester avait découvert. Il restait un grand pas à faire et de nouvelles propriétés à reconnaître.

L'emploi de cette force occupait les esprits plutôt comme une grande question à décider, que comme un problème résolu, d'une féconde application. Ce n'était plus un moteur universel qu'on cherchait, comme Brancas, mais un moyen d'élever l'eau par une puissance nouvelle, ainsi que Worcester l'avait proposé.

Cette direction spéciale dut influer beaucoup sur la lenteur des progrès qu'on fit dans une carrière ouverte déjà depuis plus de 50 ans.

Papin, physicien français, à qui le maniement de la vapeur devait être familier, à l'occasion du *digesteur* qui porte encore son nom, et que des relations fréquentes avec l'Angleterre, théâtre principal des recherches sur la force de la vapeur, avait mis à même de suivre celles qu'y faisaient Worcester et ses imitateurs, proposa, dès 1695, de soulever un piston par l'action de la vapeur, et d'opérer un vide sous le piston, en laissant refroidir cette vapeur, pour le faire redescendre par la pression de l'atmosphère.

C'était bien là le principe de la machine atmosphérique dont on tira plus tard un si grand parti; c'était aussi replacer le problème dans toute sa généralité, et offrir en même temps une nouvelle solution générale, suceptible, comme on l'a vu depuis, d'une grande étendue d'applications.

Mais si Papin, en proposant le cylindre et le piston, reconnut les véritables principes sur lesquels on a fondé les machines à vapeur; s'il indiqua la seule bonne manière, qu'on connaisse encore aujourd'hui, de recevoir l'action de la vapeur, il n'alla pas jusqu'à composer la machine comme il convenait pour être d'un service sinon praticable, du moins facile à gouverner : il proposait d'ôter, chaque fois, de dessus le feu, le cylindre dans lequel opérait la vapeur, lorsqu'on voulait y faire le vide, par le refroidissement spontané de cette vapeur.

Papin, qui avait tant opéré sur la vapeur, et à qui même l'on doit la soupape de sûreté, ne découvrit point la manière de condenser la vapeur subitement, par une injection d'eau froide; il conçut tout entier le principe de la machine atmosphérique,

mais il ne sut pas l'appliquer, et son principe ne fut utilement employé que 16 ans après.

Dans l'intervalle, en 1698, Savery, soit qu'il connût, soit qu'il ne connût pas les travaux de Brancas, de Worcester, de Morland, et de Papin, revint sur l'application de la vapeur, pour élever l'eau, à la manière de Worcester, avec cette différence cependant que Savery apprit à condenser la vapeur par une injection d'eau froide, et élevait l'eau après l'avoir aspirée dans les capacités dont il se servait.

Dans les mains de Savery, l'appareil à élever l'eau par l'action combinée de la tension de la vapeur et de la pression atmosphérique, devint véritablement usuel et d'une application facile, quoique toute spéciale ; c'est ce qu'on n'avait pas encore vu jusqu'alors ; et depuis, quand on a voulu élever l'eau par l'action directe de la vapeur sur la surface du liquide, on n'a pas changé essentiellement la machine de Savery ; si ce n'est qu'au lieu d'ouvrir et de fermer les robinets à la main, comme le faisait Savery, on a réglé le mouvement de la machine par la machine même, ainsi que l'avait déjà tenté le Portugais Mourra, par le moyen d'un flotteur.

Toutefois, le but qu'on aurait voulu atteindre, l'épuisement de l'eau qui menaçait d'envahir les principales mines d'Angleterre, ne put l'être avec le procédé de Savery : la force de la vapeur ne pouvait pas s'y développer avec une puissance proportionnée à la hauteur de ce but; d'ailleurs comment aller chercher l'eau à de grandes profondeurs, et si fort au delà des limites d'aspiration de la machine de Savery?

Il fallait un autre mode d'application pour la force de la vapeur; il fallait un autre système mécanique, pour mettre sa puissance en valeur.

Amontons en proposa un, en 1699, à l'Académie des Sciences

de Paris; c'était une roue sur la circonférence de laquelle on avait réparti des capacités, les unes pleines d'eau, les autres pleines d'air, et communiquant les unes aux autres par des soupapes qui ne s'ouvraient que dans un sens; l'action du feu sur une portion de cette circonférence portait l'eau des capacités sur une autre portion et entraînait ainsi le mouvement de la roue, qui, d'ailleurs, touchait par un autre point à de l'eau froide, pour condenser la vapeur après son action. Ce moyen compliqué, inapplicable dans l'état dans lequel l'auteur l'avait présenté, n'eut point de suite.

On en revint, en Angleterre, au principe de Papin, et il était réservé au génie hardi de Newcomen et de John Cowley, que leurs professions semblaient rendre étrangers à toutes spéculations mécaniques, de mettre ce principe fécond en pratique; il le fut par eux en 1711 d'une manière qui pouvait répondre à la puissance imposante de la vapeur.

Cependant, soit par les difficultés réelles que présente la construction d'un mode quelconque de recevoir et de transmettre l'action de la vapeur, soit par le peu de ressources que devaient trouver Newcomen et Cowley dans l'art de construire, alors encore dans l'enfance, ce ne fut que vers l'année 1718 que la machine atmosphérique fut employée en grand.

Newcomen faisait ouvrir et fermer les robinets, en un mot, réglait la machine à la main : un jeune garçon, chargé de ce soin et probablement ennuyé de répéter sans cesse les mêmes mouvemens, sans pouvoir quitter un instant la machine, imagina de se faire remplacer par la machine même, en établissant une communication fort simple dans le système de régulateur, employé alors par Newcomen. Henri Beighton, mécanicien éclairé, profita de l'idée du jeune homme et perfectionna le régulateur, en diminuant de beaucoup la complication de son système.

La destination de la machine atmosphérique resta longtemps encore affectée seulement à l'élévation de l'eau, malgré les recherches de Hulls, en 1736, sur l'emploi d'un volant et d'un axe à double manivelle, manœuvrés par la tige du piston, et celles de Falck, en 1779, pour faire concourir deux cylindres à produire un double effet par la machine atmosphérique.

Cependant dès l'année 1769, l'objet des machines à vapeur appela les méditations et les recherches d'un esprit fait pour sortir de la route ouverte par Newcomen, et que suivaient, comme aveuglément, les divers constructeurs de ces machines.

Pour sortir des routes battues, il fallait étudier la vapeur elle-même, et porter, dans l'examen de ses fonctions comme moteur, les lumières acquises dans ce temps, sur la chaleur et sur les phénomènes qu'elle présente dans ses relations avec les corps; il fallait pouvoir tirer de là les moyens de diminuer la grande consommation de combustible qu'exigeait la machine de Newcomen, et qui seule aurait suffi pour restreindre l'usage de ce moteur; il fallait enfin unir aux lumières d'un savant la persévérance infatigable d'un bon observateur et l'habileté d'un artiste.

Watt eut ces qualités-là, et, s'affranchissant pour ainsi dire de tout ce qui s'était fait avant lui, il posa pour la première fois le problème, non-seulement dans toute sa généralité, mais encore avec toutes ses conditions et d'économie et de construction; il le posa et le résolut.

L'industrie eut un moteur de plus, et ce moteur une puissance indéfinie.

La nature avait formé le génie de Watt, et les circonstances le servirent et le développèrent; il trouva un pays et des hommes

pour l'entendre, et c'est à son association avec Boulton de Soho, vers 1774, qu'a commencé une nouvelle ère pour les machines à vapeur.

Watt embrassa comme d'une seule vue et les principes théoriques des machines à vapeur, et tous les moyens de construction qui pouvaient perfectionner leur service.

Le premier, il opéra la condensation hors du cylindre pour ne pas le refroidir par l'injection; il fit avec un seul cylindre une machine à double effet, en dirigeant alternativement la vapeur dessus et dessous le piston, par un habile système de régulateur; la construction et du cylindre et du piston fut grandement améliorée; le volant devint une pièce essentielle des machines à vapeur, grâce aux dispositions qu'il sut donner aux communications du balancier avec la tige du piston, et avec la manivelle du volant; le vide partiel opéré par la simple condensation fut accompli, régularisé par l'établissement de la pompe à air, qui donne aux mouvemens de la machine une précision que Watt accrût encore par le modérateur qu'il imagina; enfin s'il fallait rapporter tout ce que Watt a fait pour les machines à vapeur, il faudrait les décrire telles qu'elles sont en général aujourd'hui; et, chose remarquable, on trouve consigné, explicitement ou implicitement, dans la première *patente* qu'il fit sur ce sujet, tous les principes de perfectionnemens et d'améliorations qui ont été exécutés depuis, soit par Watt lui-même, soit par ses imitateurs.

Ainsi, Oliver Évans aux États-Unis, et en Angleterre Trevithick et Vivian, pour leurs machines à haute pression; avant eux, Hornblower, pour sa machine à deux cylindres et à expansion; après lui Woolf, pour le même objet, et bien d'autres habiles constructeurs qu'on pourrait citer, tous ont pris jusqu'à présent dans les travaux de Watt, les principes fondamen-

taux des améliorations apportées dans les machines qui portent leurs noms.

Avant Watt, on avait conçu et appliqué la force de la vapeur; mais Watt en a fait, le premier, un moteur universel. Il a vécu assez long-temps pour jouir de sa renommée et de ses succès; à sa mort, les machines les mieux construites et du service le plus assuré et le plus régulier, sortaient de ses ateliers; depuis, on n'a rien fait de mieux, sous ce double rapport.

C'est donc à des faits nouveaux, à des combinaisons mécaniques nées de recherches nouvelles, qu'il appartient désormais d'élever le point de perfection où Watt a laissé les machines à vapeur.

CHAPITRE LI.

Conclusion du premier livre.

L'examen des moteurs, auquel nous avons consacré le premier livre, nous a montré d'où venait la force et comment il fallait en recevoir l'action, pour obtenir un mouvement applicable à un travail industriel quelconque; nous avons vu dans quelles limites la puissance des moteurs est nécessairement restreinte pour chaque circonstance donnée, et quelle est la valeur de cette puissance.

Les seules *causes de mouvement* que nous ayons trouvées, et que la science connaisse, sont les êtres animés, la pesanteur par l'intermédiaire de l'eau ainsi que de l'air, et enfin le feu et l'expansion des fluides aériformes. Il n'est pas de force motrice

ailleurs ; et pour produire du mouvement à la surface de la terre, pour exécuter un travail mécanique quelconque, il faut, de toute nécessité, mettre en jeu l'une de ces causes.

Dans l'examen particulier que nous avons fait de la dernière, nous n'avons parlé que de la vapeur d'eau, parce qu'elle est maintenant une force dont on dispose tout aussi aisément que des bras de l'homme, ou d'un cours d'eau; et si nous avons passé sous silence les essais ingénieux de M. Bonnemain, pour tirer parti de la dilatation des liquides, comme puissance motrice; ceux de M. Cagniard-Latour, pour faire agir l'air dilaté, et ceux de M. Nièpce, pour développer de la force expansive par la combustion subite de matières inflammables, c'est que nous nous sommes crus obligés de ne traiter, dans cet ouvrage, que les objets dont l'industrie fait ou peut faire actuellement usage.

La liste des moteurs est fermée, dans l'état présent de nos connaissances; ce n'est peut-être que des progrès nouveaux de la chimie que la mécanique pourra désormais en obtenir d'analogues à la vapeur. Cette liste est assurément bien courte ; mais celle des modes d'application est susceptible de s'étendre indéfiniment.

Quoi qu'il en soit, les mouvemens obtenus immédiatement des moteurs, par un mode d'application quelconque, sont d'une uniformité, d'une spécialité, si on peut le dire, qui en restreindraient singulièrement le service industriel, si la science n'apprenait point à transmettre, à transformer, à modifier ces mouvemens primitifs d'autant de façons que le travail peut l'exiger. C'est le sujet que nous allons traiter dans le second livre.

LIVRE SECOND.

DES MÉCANISMES AYANT POUR OBJET DE TRANSMETTRE, DE TRANSFORMER ET DE MODIFIER LE MOUVEMENT PRIMITIF DES MOTEURS.

CHAPITRE PREMIER.

Considérations générales sur l'objet de ce livre.

Nous avons vu, dans le livre précédent, que les mouvemens qu'on obtient immédiatement des moteurs, par les divers modes d'applications qu'ils reçoivent respectivement, sont toujours, ou des mouvemens de rotation dans le plan vertical ou horizontal, ou des mouvemens de *va-et-vient* rectilignes ou par arcs de cercle; et ces mouvemens ont lieu dans la place même où le moteur agit. Or, il est à remarquer 1°. qu'en général le travail ne se fait point à l'endroit où l'action des moteurs s'applique, mais à une distance plus ou moins rapprochée; qu'il faut envoyer le mouvement en différentes directions, sur un ou plusieurs points de travail; 2°. qu'en général la vitesse du point d'application du moteur n'est point celle qu'il convient de donner aux pièces qui exécutent l'opération mécanique; 3°. que l'espèce de mouvement obtenu immédiatement du moteur, est rarement celle dont on a besoin pour le travail, eu égard du moins au plan dans lequel le mouvement moteur a lieu: ainsi, par exemple, ce dernier a un mouvement de rotation dans le plan vertical, et l'on a besoin de ce même mouvement, mais dans le plan horizontal; ou bien le mouvement moteur est rectiligne de *va-et-vient*, et l'on veut un mouvement de rotation

continu, ou quelque autre espèce de mouvement; 4°. il faut remarquer enfin que l'action du moteur peut être irrégulière, et qu'il faut la rendre régulière; qu'elle peut agir sans interruption, et qu'il faut l'interrompre à des intervalles déterminés; qu'elle peut avoir une vitesse constante, et qu'il faut l'accélérer ou la retarder, etc., etc.

Il suit de là que pour se disposer à exécuter, en général, des opérations mécaniques, il ne suffit pas de savoir recueillir l'action immédiate du moteur, par un mode judicieux d'application, il faut encore savoir la transmettre à diverses distances, et en diverses directions, soit intégralement, soit par parties; varier la vitesse du mouvement, en transformer l'espèce en toute autre plus convenable au but qu'on se propose, et enfin en modifier la nature suivant les besoins du travail.

Pour opérer ces divers effets, les moyens sont en grand nombre, et il y en a même de plusieurs espèces pour chacun de ces effets; on peut les varier à l'infini et de formes et de dispositions; il n'y a point de doctrine sur ce sujet, qui n'est composé en général que de problèmes particuliers, résolus pour une foule de cas, ou qu'il s'agit de résoudre dans quelques cas nouveaux, ou pour d'autres convenances; mais alors la solution dépend le plus souvent des inspirations du génie, et quelquefois de faciles applications de la géométrie.

Cependant, les moyens de transmettre l'action des moteurs avec des vitesses différentes sont soumis à une théorie fort simple, à la vérité, mais qui embrasse tous les cas de cette espèce. A l'exception de cette théorie, tout le reste de ce livre n'est qu'une suite d'exemples pour montrer comment on a résolu les divers problèmes que ce sujet comporte.

Nous nous bornerons à ne rapporter que les moyens les plus en usage, regardant comme peu utile d'entrer dans le dénom-

brement de ceux par lesquels on a pu quelquefois les remplacer, et qu'on n'emploie pas ordinairement dans les bonnes constructions.

D'ailleurs toutes les personnes qui s'occupent de machines ou qui veulent sérieusement s'en occuper, imaginent toujours assez facilement les moyens dont ils ont besoin pour produire les divers effets dont nous venons de parler, lorsque ce qui est généralement employé ne convient pas de tous points au cas particulier où elles se trouveraient.

Nous nous arrêterons donc peu sur ce sujet, et seulement pour montrer comment le mouvement-moteur le plus simple peut répondre à tous les besoins du travail mécanique et aux conceptions du mécanicien. Du reste nous renvoyons les personnes curieuses de ces sortes de détails à l'ouvrage de MM. Lanz et Bétancourt, sur la composition des machines, et à celui de M. Borgnis sur le même sujet.

CHAPITRE II.

De la transmission du mouvement moteur à diverses distances, dans la même direction ou dans des directions différentes avec la même vitesse, ou avec des vitesses différentes.

Une des transmissions les plus simples est celle qui a lieu par une *bielle* ou par une *poutrelle* (pl. 30, fig. 1 et 2), que le mouvement primitif soit rectiligne ou par arcs de cercle, ou bien qu'il soit de rotation continue. Ces moyens servent lorsqu'on veut transmettre le mouvement à une distance peu éloi-

gnée et sans changement de direction : s'il y avait une grande distance à franchir, il serait nécessaire, pour l'emploi des bielles ou poutrelles, de placer entre elles, d'intervalle en intervalle, des *varlets* (fig. 3).

Ces varlets oscillent sur leur axe A, et les bielles, qui prennent alors la dénomination de *tirans*, y sont attachées par des articulations *b*, *b*, *b*, *b*. Les varlets remédient à la flexibilité de ces tiges de transmission, et dispensent de leur donner une longueur et une grosseur qui augmenteraient beaucoup l'inertie du système.

Si le mouvement à transmettre est de rotation, on emploie généralement *un arbre de couche* (fig. 4). On le voit soutenu par ses collets A, A, tournant régulièrement entre deux coussinets de cuivre ou de bois dur, superposés et dont on voit la coupe verticale en *b*.

Pour allonger la transmission, par ce moyen, on unit bout à bout plusieurs arbres de couche, par des manchons ou boîtes en fonte *c* et *c*, composés de deux parties qui viennent embrasser les deux bouts en contact de deux arbres de couche, et pénétrant l'un dans l'autre par le tenon, ou saillie ponctuée *d*.

La principale qualité d'un arbre de couche est de tourner bien rond ; et pour cela il faut que, sur toute sa longueur, il soit rigoureusement dans les directions du mouvement qu'il doit transmettre ; qu'il soit, par exemple, bien horizontal sur tous les points, et notamment sur ceux où l'on a placé les manchons pour prolonger l'arbre de couche, si la transmission est dans le sens horizontal. S'il venait à fléchir sur quelques points de sa longueur, il perdrait évidemment cette qualité et le frottement sur les collets A serait énorme. C'est pour éviter cet inconvénient qu'on les fait en fonte ou en fer forgé, dans les bonnes constructions. On a soin encore de proportionner leur

grosseur à la force qu'ils doivent transmettre pour éviter la torsion qui les mettrait hors de service.

Il arrive quelquefois qu'il est nécessaire de faire dévier un peu la transmission opérée par un arbre de couche; on se sert alors du *joint universel* (fig. 5). C'est une manière d'unir bout à bout deux arbres de couche légèrement inclinés l'un vers l'autre : pour cela le bout de chaque arbre est terminé par une fourchette A, et on les articule perpendiculairement l'une à l'autre, par deux axes en croix *b*, *b*, dont les tourillons sont reçus dans les quatres branches des deux fourchettes. Ce mode d'articulation se prête à une transmission régulière du mouvement de rotation sur une ligne droite brisée au point où cette articulation est établie.

Un autre moyen, généralement en usage, de transmettre le mouvement à une assez grande distance, est l'emploi des cordes et des courroies. Il ne sera peut-être pas inutile d'entrer dans quelques détails au sujet des cordes et du genre de résistance qu'elles présentent dans leur service.

Les cordes de chanvre sont, comme on sait, le plus en usage Elles sont composées de ce que les cordiers appellent *fils de caret*. Ce fil est formé par la réunion de plusieurs filamens de chanvre. On appelle *toron*, la réunion de plusieurs fils de caret; et une corde ou un câble est composé de plusieurs torons.

Bien que les cordes soient flexibles, elles ne le sont pas cependant parfaitement, et elles perdent même de leur flexibilité par la tension qu'elles subissent chaque fois qu'elles travaillent.

On appelle *raideur*, ce qui manque à leur flexibilité; et cette raideur présente une résistance particulière, lorsqu'elles transmettent le mouvement, en se pliant ou en s'enroulant.

Il en est de cette résistance comme de celle des frottemens;

il est impossible de l'évaluer avec exactitude, mais voici ce que l'expérience apprend sur ce sujet.

La résistance des cordes provient principalement de trois choses : 1°. de la charge qui tient les cordes tendues ; 2°. de leur grosseur ; 3°. du diamètre des poulies ou des cylindres sur lesquels elles doivent s'enrouler.

On a remarqué qu'en général *la résistance des cordes est en raison directe des forces de tension, à peu près en raison inverse des diamètres des rouleaux ou poulies sur lesquels elles s'enroulent, et qu'elle croît à peu près comme le carré de leurs diamètres ou de leurs grosseurs.*

Coulomb a observé que pour plier des cordes de diverses grosseurs, sur un rouleau de 4 *pouces* de diamètre, il fallait

		Livres.		Livres.
Pour une corde blanche de 30 fils de caret,		4,2	et ajouter pour chaque quintal de charge	9,1.
Idem	15	1,2	*idem*	5,1.
Idem	6	0,2	*idem*	2,2.
Idem goudronnée de	30	6,6	*idem*	11,2.
Idem	15	2,0	*idem*	5,6.
Idem	6	0,4	*idem*	2,4.

Les cordes neuves présentent une résistance un peu plus grandes que les cordes usées, dans le rapport de 17 à 14.

Coulomb a remarqué en outre qu'une grosse corde surtout, qui reste long-temps tendue ou enroulée, présente un peu plus de résistance que celle qui s'enroule et se déroule alternativement, et sans interruption, comme dans les sonnettes à enfoncer les pilotis, et dans plusieurs autres machines ; qu'une corde a moins de raideur lorsqu'elle vient se plier sur une poulie, immédiatement après avoir passé sur une autre poulie : on remarque en effet que l'effort à faire dans ce cas n'est pas le même que si la corde se pliait sur la seconde poulie, long-temps après s'être pliée sur la première.

Il est reconnu encore que les cordes trop fortement tordues ont plus de raideur que les autres, et se cassent plus facilement surtout quand elles sont mouillées.

Les cordes de soie sont les plus flexibles; celles de coton viennent après et sont employées toutes les fois qu'il faut transmettre une petite force et obtenir un mouvement *très-doux*.

Lorsque la force à transmettre est considérable, il est plus avantageux de se servir de cordes plates; on en connaît à présent qui sont composées de trois ou quatre cordes posées parallèlement et qu'on maintient ainsi réunies en les cousant ensemble avec de la forte ficelle. Il est certain qu'elles ont beaucoup moins de raideur, eu égard au degré de tension qu'elles peuvent supporter; et l'on prétend qu'elles ont aussi de grands avantages sous le rapport de la force.

On remplace souvent les cordes par des courroies de cuir pour transmettre le mouvement de rotation. Nous ne savons pas si l'on a fait des expériences pour connaître la résistance des courroies de diverses épaisseurs et largeurs; mais nous avons eu occasion de remarquer qu'une courroie qui a travaillé pendant quelques jours présente une très-faible résistance en comparaison de celle que présenterait une corde de même force et dans les mêmes circonstances.

Les chaînes servent plutôt à soutenir des fardeaux qu'à transmettre un mouvement de rotation à distance; on les emploie cependant quelquefois, soit pour des petites forces, soit pour des grandes; dans le premier cas, on se sert ordinairement de chaînes à la Vaucanson; dans le second, on se sert de chaînes à maillons fort variés. L'extension que ces chaînes subissent par le travail, et la perfection d'exécution qu'elles doivent avoir pour être préférées, dans certains cas, aux cour-

roies ou à quelqu'autre moyen de transmission, en restreignent tous les jours l'emploi.

CHAPITRE III.

Continuation du même sujet : des machines vulgairement appelées élémentaires.

Nous avons à examiner ici d'autres moyens de transmission, dont l'objet principal est presque toujours de changer la vitesse du mouvement-moteur, en le transmettant, et de le porter en différentes directions.

Ces moyens peuvent être tous considérés comme des combinaisons de *leviers* plus ou moins simples; c'est par cette raison qu'on appelle vulgairement le levier une machine ou un mécanisme élémentaire; on pourrait considérer encore comme tel *le plan incliné*.

Ces mécanismes élémentaires sont connus et employés de temps immémorial.

On rapporte que lors de la conquête du Pérou, les Espagnols furent fort étonnés de voir les Péruviens employer, dans la construction de leurs habitations, des pierres d'un poids énorme, sans le secours de machines proprement dites.

Les deux ou trois premières rangées de pierres n'étaient assurément pas difficiles à former; mais lorsqu'il s'agissait d'élever ces lourdes masses à la hauteur de quelques mètres, les bras seuls ne suffisaient plus, et voici comment on s'y prenait,

faute de moyens plus expéditifs : on roulait les pierres avec des pièces de bois, comme nos maçons avec leurs levier de fer, ou *pieds de chèvre ;* et pour les élever, on établissait un massif de terre en talus, adossé à la muraille à laquelle on travaillait, et l'on faisait avancer les grosses pierressur ce talus. On élevait ce massif de terre, en adoucissant la pente, au fur et à mesure que la muraille avançait ; une fois finie, on enlevait ce bizarre échafaudage.

Le levier simple et le plan incliné étaient donc, à ce qu'il paraît, les seules machines que les Péruviens connussent, pour faire des constructions importantes; ils faisaient usage des deux élémens principaux de nos machines, et ils ignoraient les combinaisons que les peuples civilisés en ont faites de tout temps.

Mais revenons à ce qu'on doit entendre par levier, et aux effets qu'on en obtient.

Si, au moyen d'une tringle de bois ou de fer, vous cherchez à pousser un fardeau devant vous, en appuyant cette tringle dessus, et si vous employez une force suffisante pour mouvoir ce fardeau, il aura la même vitesse que celle que vous vous donnerez, c'est-à-dire qu'il y aura transmission pure et simple du mouvement-moteur, sans aucun changement ; c'est comme si vous entraîniez une pierre, par une corde qui lui serait attachée.

Cette tringle, cette corde, ne sont pas ce que nous devons entendre par levier.

Mais que l'on introduise, par exemple, sous une lourde pierre, une pièce de bois, et que l'on mette un petit tasseau sous cette pièce de bois, le plus près possible de l'extrémité engagée sous le fardeau, et de manière à faire servir ce tasseau d'une sorte d'appui, on soulèvera, sans un grand effort, la pierre toute lourde qu'elle est, si le bâton est un peu long ; on la fera

mouvoir aisément encore en appuyant le bout du bâton contre terre sous ce fardeau et en l'élevant contre lui.

Ce bâton ainsi employé est ce qu'on appelle un levier simple.

Or ce levier, en transmettant votre propre mouvement au fardeau, l'a changé, quant à la vitesse : celle du mouvement-moteur a été plus grande que celle de ce fardeau, et c'est pour cela qu'avec un petit effort relatif vous avez remué un lourd fardeau.

Il y a trois choses à considérer dans le levier : 1°. Le point d'application du mouvement-moteur; 2°. le point d'appui du levier ; 3°. le point auquel le mouvement-moteur est transmis, ou le point du levier sur lequel l'effet mécanique est produit.

On désigne vulgairement ces trois choses, sous les noms de *puissance*, *point d'appui* et *résistance*.

Le levier, représenté par la fig. 6, nous montre le point d'application de la puissance en A ; le point d'appui en B, et le point de résistance en C.

On appelle *bras de levier de la puissance*, la portion de levier qui est entre le point d'appui et la puissance, ou A B, et *bras de levier de la résistance*, la portion B C.

Nous savons comme par instinct, que si le point d'appui est au milieu du levier, c'est-à-dire que si le bras de levier de la puissance est égal à celui de la résistance, le mouvement transmis n'éprouverait aucun changement de vitesse, ou si l'on veut il faudrait, pour tenir le levier en équilibre, mettre un poids égal à chaque extrémité, comme nous le voyons dans une balance ordinaire ; et si le levier vient à osciller, comme les poids sont égaux de chaque côté, les vitesses respectives seront égales, ainsi que les quantités de mouvement.

Les vitesses sont égales, en effet, lorsque le point d'appui

est au milieu; car le levier venant à osciller sur le point d'appui, comme centre de mouvement, il décrit nécessairement par chacune de ces extrémités des arcs de cercle égaux; c'est-à-dire que la puissance parcourt le même espace que la résistance, et dans le même temps; les vitesses sont donc égales; et elles sont égales encore une fois, parce que le bras de levier de la puissance et celui de la résistance sont égaux.

Mais si le bras de levier de la puissance était, par exemple, *dix fois* plus long que le bras de levier de la résistance; ou, en d'autres termes, si le point d'appui d'un levier de 11 décimètres de longueur, était à un décimètre de la résistance et à 10 décimètres de la puissance; la vitesse de la résistance serait = 1, et celle de la puissance serait = 10; ce levier changerait donc ainsi la vitesse du mouvement-moteur qu'il transmettrait.

Il suit de là qu'avec un levier de cette sorte une puissance représentée par un kilogramme ferait équilibre à une résistance de 10 kilogrammes : elle jouit cependant de la même quantité de mouvement qu'il en est résulté au point de la résistance, bien que celle-ci soit représentée par 10 kilogrammes : car 1 kilogramme multiplié par 10 degrés de vitesse donne 10 degrés de quantité de mouvement, comme 10 kilogrammes multipliés par 1 degré de vitesse donnent 10 degrés de quantité de mouvement.

Il suit de là encore que si un homme capable d'un effort de 25 kilogrammes veut soulever un fardeau de 200 kilogrammes avec un levier, il placera le point d'appui de ce levier de manière que le bras de la puissance soit huit fois plus long que le bras de levier de la résistance, et il soulèvera le fardeau; mais il importe grandement de remarquer que l'arc décrit par la main de l'homme donnera à son effort une vitesse huit fois plus grande que celle qui sera imprimée au fardeau; pendant le

temps que le moteur parcourt un espace de huit décimètres en abaissant, par exemple, son bras de levier, le fardeau n'est soulevé que de 1 décimètre. Voulez-vous soulever ce fardeau à une hauteur de 4 décimètres dans le même temps, il faudra changer la place du point d'appui, et de telle façon que le bras de levier soit la moitié de celui de la puissance; mais alors il faudra quadrupler l'effet du moteur, puisqu'en raccourcissant son bras de levier vous avez diminué sa vitesse dans cette proportion.

On peut dire en général que, pour un levier en équilibre, *la puissance est à la résistance comme le bras de levier de la résistance est au bras de levier de la puissance :* ce qui signifie que pour tenir en équilibre un *grand poids* de résistance par un *petit poids* de puissance, il faut que le bras de levier de la puissance excède en longueur celui de la résistance autant que le poids de la résistance surpasse celui de la puissance.

Si donc vous voulez savoir quel *effort* exprimé, par exemple, en kilogrammes, un moteur exerce sur l'extrémité d'un levier, et quel *effet* aussi en kilogrammes il produit à l'autre extrémité, dans la transmission de mouvement que ce levier opère; vous comparerez les vitesses respectives du point d'application de l'effort, et du point d'application de l'effet; et vous direz, le nombre de kilogrammes qui représente l'effort est au nombre de kilogrammes qui représente l'effet, comme la vitesse de l'effet est à la vitesse de l'effort.

Un nouvel exemple achèvera d'éclaircir ce qui précède : vous voulez, supposons, élever à un centimètre de hauteur un poids de 1000 kilogrammes, ou plus généralement produire un effet équivalant à 1000 kilogrammes élevés à un centimètre de hauteur, et cela par le moyen d'un levier simple. Si l'effort dont votre moteur est capable n'est que de 10 kilogrammes, il

faudra arranger le point d'appui de votre levier de telle manière que, pendant le temps que le poids de 1000 kilogrammes s'élèvera à un centimètre, le point d'application de votre moteur ait parcouru un espace de 100 centimètres; que s'il est capable d'un effort de 100 kilogrammes, il ne devra parcourir, pendant ce temps, qu'un espace de 10 centimètres pour produire le même effet, et ainsi proportionnellement pour d'autres nombres.

Il est nécessaire de remarquer que la puissance et la résistance sont altérées, l'une dans son action, l'autre dans sa réaction, lorsque leurs directions ne sont pas perpendiculaires à l'extrémité de leurs bras de levier respectifs. L'action et la réaction sont à leur *maximum* de force, dans le seul cas d'une direction perpendiculaire; et elles s'éloignent d'autant plus de ce *maximum* que ces directions sont plus inclinées par rapport au levier.

Si vous supposez le point d'appui fixe et inébranlable, et que la puissance agisse dans la direction du prolongement du levier, elle *poussera* directement contre le point d'appui, ou elle tendra à *attirer* à elle ce point d'appui, sans produire aucun effet dans ces deux cas extrêmes et opposés.

Mais si la puissance agit dans une direction également éloignée de l'un et de l'autre extrême, la totalité de son effet sera employée à vaincre la résistance, puisqu'elle ne *pousse* ni ne *tire* contre le point d'appui; or la direction qui présente, seule, cet avantage, est évidemment la direction perpendiculaire au bras de levier.

Il est reconnu, au surplus, *que les différens efforts d'une puissance appliquée à l'extrémité d'un levier, et agissant selon différentes directions, sont entre eux comme les sinus des angles que font ces directions avec le bras de levier.*

Le point d'appui n'est pas toujours entre la puissance et la résistance, comme il l'est (fig. 6). Mais cela ne change rien à la théorie du levier. Il peut être à une des extrémités et la résistance entre le point d'appui et la puissance : une *brouette* peut être considérée comme un levier de cette sorte.

La puissance se trouve agir quelquefois entre la résistance et le point d'appui : elle agit ainsi sur la perche à laquelle on a attaché un filet pour la pêche ; le pêcheur appuie le bout de cette perche contre son corps, le filet qu'il élève hors de l'eau est la résistance, et ses mains appliquées entre la résistance et l'autre bout de la perche représentent la puissance.

On n'emploie cette dernière espèce de levier que lorsque la puissance doit agir dans un espace resserré avec peu de vitesse, et que la résistance doit se mouvoir avec une plus grande vitesse. Les muscles sont des leviers de ce genre : quand on soulève un corps avec la main, en tenant le bras horizontalement, le point d'appui est à l'articulation de l'épaule ; les muscles compris entre l'épaule et le coude sont la puissance, et la résistance est à l'extrémité de la main. Qu'on juge de la forme monstrueuse que prendrait le bras, si la puissance devait décrire un arc de cercle aussi grand qu'il devrait l'être, si le point d'appui était dans l'avant-bras, près de la main, et la puissance à l'épaule !

Le placement du point d'appui détermine les leviers, qu'on nomme du *premier*, du *second*, du *troisième genre*.

La fig. 6 représente un levier du premier genre ; la fig. 7, un levier du deuxième ; et la fig. 8 un levier du troisième genre.

Les leviers simples, employés dans les arts, ne sont pas toujours droits ; ils sont quelquefois recourbés de diverses manières (voyez fig. 9 et 10). Les mêmes lettres représentent les mêmes objets que dans la fig. 6. D'autres fois ils sont angu-

laires, comme les leviers de sonnettes d'appartement, ou en demi-cercle comme certaines manivelles.

Quoi qu'il en soit, il est à remarquer que la longueur des bras de levier ne se prend point suivant les détours de la forme qu'on peut leur donner, mais suivant une ligne droite tirée du point d'appui jusqu'au point d'application de la puissance ou de la résistance.

Il faut remarquer encore, au sujet du point d'appui, « qu'il fait équilibre à la force motrice ou à la résistance, ou qu'il concourt avec l'une des deux pour porter l'effort de l'autre; dans les leviers du premier genre, par exemple, le point d'appui soutient l'effort des deux forces opposées de part et d'autre; dans ceux du second et du troisième genre, il ne porte qu'une partie de l'une des deux.

» Ce n'est pas toujours un point fixe et inébranlable qui sert d'appui; le plus souvent ce sont des corps flexibles, ou qui peuvent s'écraser, ou bien des corps animés dont la résistance n'est point à l'épreuve de tout effort. Lorsqu'une poutre, par exemple, repose par ses extrémités sur les deux murs d'un bâtiment, son propre poids, ou celui dont elle est chargée, les ferait s'écrouler s'ils n'étaient bâtis assez solidement. Les mulets qui portent des brancards succombent sous la charge quand elle excède leurs forces. Il est donc important de savoir de combien est chargé le point d'appui, ou ce qui en fait l'office, lorsque deux autres forces agissent l'une contre l'autre sur le même levier, afin de pouvoir le mettre en proportion avec l'effort qu'il doit soutenir. Comme ce point d'appui pourrait bien être de nature à ne pas résister également dans toutes sortes de directions, il faut examiner aussi comment se dirige l'effort qu'il soutient, par les différentes directions qu'on peut donner à la puissance et à la résistance....

» L'effort qui vient de la masse, et qu'on peut nommer *absolu*, est limité; une *livre* ou l'action d'une puissance équivalant à une *livre*, lorsqu'elle pèse sur le bras d'un levier, dans la direction la plus avantageuse, ne peut que faire équilibre à un pareil poids qui lui est opposé, avec les mêmes circonstances. Mais l'effort qui vient de la distance au point d'appui peut croître à l'infini; de sorte que si l'un des deux bras était cent fois aussi long que l'autre, une livre deviendrait équivalente à cent. Quelle sera donc la charge sur le point d'appui : premièrement s'il y a équilibre avec égalité de masse; secondement si les masses ou les forces sont en équilibre, par l'inégalité de leurs distances au point d'appui?

» Pour répondre à la première question, on dit que si les directions de la puissance et de la résistance sont parallèles entre elles, le point d'appui se trouve chargé de la somme des deux forces absolues, et son effort se fait dans une direction parallèle à celles de la puissance et de la résistance.

» Mais si les directions des deux forces opposées sont inclinées une à l'autre, le point d'appui ne porte qu'une partie de leur effort absolu; il en porte d'autant moins qu'elles sont plus inclinées au levier, et sa résistance tend au point de concours de ces deux directions.

» Quant à la seconde question, savoir quel est l'effort qui se fait sur le point d'appui, lorsque la puissance et la résistance se mettent en équilibre, par des distances inégales entre elles et le point d'appui, on répond que cet effort n'est jamais plus grand que la somme des forces absolues, ou des masses qui sont opposées; c'est-à-dire que si le poids d'une *livre* en soutient un de douze, parce qu'il agit par un bras de levier qui est douze fois plus long que celui de l'autre part, le point d'appui ne peut jamais être chargé que de 13 *livres* et non pas de 24; et

son effort se dirige, comme dans les cas précédens, parallèlement aux directions des forces qu'il soutient, si ces directions sont parallèles entre elles; ou bien directement au point de leur concours, si elles sont inclinées l'une à l'autre.

» Puisque l'on peut savoir combien il se fait d'effort sur un appui ou sur tout ce qui en fait l'office, lorsqu'on connaît la valeur absolue des puissances et leurs directions à l'égard du levier par lequel elles agissent, on peut donc prévenir les accidens qui pourraient naître des disproportions, ou mettre à profit des forces qu'on regarderait comme insuffisantes, si l'on ne savait pas les appliquer avec tout l'avantage qu'elles peuvent avoir.

» Que l'on place, par exemple, une charge de 200 *livres*, au milieu d'un levier dont les extrémités reposent sur les épaules de deux hommes; ces deux appuis suffiront au fardeau, si chacun des porteurs est capable de soutenir 100 *livres :* mais si l'un des deux n'en peut porter que 50, quand bien même l'autre pourrait suffire à un effort de 150 *livres*, le plus faible ne succombera pas moins, tant que le fardeau sera à égales distances entre son collègue et lui; et tous les deux deviendront inutiles pour l'ouvrage qu'on en attendait. Mais que l'on place la charge plus loin du porteur le plus faible, et que les bras du levier, devenus inégaux, soient en raison réciproque des efforts dont les deux hommes sont capables, alors le fardeau sera soutenu comme il aurait pu l'être d'abord par deux autres hommes qui auraient pu suffire chacun à un effort de 100 *livres*.

» Qu'un charpentier porte une solive, c'est toujours à peu près par le milieu de la longueur qu'il la pose sur son épaule : en la plaçant ainsi, il ne porte que le poids de la pièce de bois, parce que les deux bouts qui passent de part et d'autre se font équilibre réciproquement, et le point d'appui n'est chargé que

de la somme totale des deux masses. Mais s'il la posait aux deux tiers ou aux trois quarts de sa longueur, il serait obligé, pour l'empêcher de tomber, de la retenir avec ses bras par le bout le plus court, et cet effort serait équivalent à un poids qui ferait équilibre avec l'excès de la longueur que la solive aurait du côté opposé. L'épaule du porteur serait donc inutilement chargée de cette quantité de plus.

» Ces deux exemples qu'on vient de citer sont si simples et se rencontrent si fréquemment, que la plupart de ceux qui nous donnent lieu de les remarquer suppléent au raisonnement par l'habitude et par le seul instinct de la nature. Mais il y a une infinité de cas où l'on a besoin d'être instruit et de réfléchir, et où l'on ne réussit que par une application raisonnée de ces mêmes principes dont nous avons naturellement une idée confuse.

» Ce n'est aussi qu'en réfléchissant sur ces lois de la nature qu'on peut se rendre compte d'un nombre infini de précautions et d'usages que nous adoptons dès l'enfance, et que nos besoins et la seule industrie ont fait naître. » (Nollet, *Leçons de physique expérimentale.*)

Il s'agit maintenant d'examiner les effets du plan incliné (qui se définit de lui-même) dans la transmission du mouvement.

Nous savons que s'il s'agissait d'élever un corps à une hauteur quelconque, sans employer aucun moyen mécanique, la puissance devrait être assez grande pour surmonter les efforts de la pesanteur qui sollicitent à chaque instant le corps à retomber. Or si on le fait parvenir à cette hauteur par un plan incliné, nous concevrons que ce corps étant en partie supporté par ce plan, il n'est plus nécessaire d'employer les mêmes efforts, ou pour le soutenir, ou pour lui faire atteindre le but proposé.

Nous concevrons encore qu'il faudra en déployer d'autant moins que ce plan sera plus incliné ; que sa longueur sera, par conséquent plus considérable, la hauteur du plan restant la même.

D'où il suit 1°. que dans le cas où la direction de la puissance est parallèle à la longueur du plan (ce qu'on est ordinairement le maître d'établir) *la puissance doit être au fardeau comme la hauteur du plan est à sa longueur*. Par exemple, s'il faut élever 2000 kilogrammes à la hauteur verticale de 50 mètres, par un plan incliné dont la longueur soit de 200 mètres, une puissance de 500 kilogrammes suffira, si elle est animée d'une vitesse quelconque, pour élever le fardeau.

2°. Si la direction de la puissance est horizontale et parallèle à la base du plan incliné, *la puissance, dans ce cas, est au fardeau comme la hauteur du plan est à sa base.*

3°. Enfin dans toute espèce de direction de puissance, *le fardeau et celle-ci sont entre eux comme les sinus des angles que font, avec la ligne tirée du centre de gravité du fardeau perpendiculairement sur le plan incliné, la direction de la puissance et la ligne verticale, qui est la direction suivant laquelle la pesanteur tend à faire tomber le fardeau.*

CHAPITRE IV.

Continuation du même sujet : des poulies, des moufles, roues dentées, coins, vis et tambours.

Avec le levier, tel que nous l'avons décrit, vous ne pouvez mouvoir la résistance que suivant des directions diamétralement opposées aux directions de la puissance, ou absolument dans le même sens; et en outre l'espace que parcourt la résistance est très-limité, car il est proportionnel au bras de levier qui ne peut être très-long sans devenir incommode, lourd, fragile, ou impraticable.

Par les mêmes raisons, nous ne pourrions produire de grands *effets de masse* à l'aide d'un simple levier : il faudrait en combiner plusieurs ensemble, et de telle façon que l'extrémité de l'un agît sur l'extrémité de celui qui le suivrait.

Ce serait ainsi, par exemple, qu'au lieu de soulever une masse de 2000 kilogrammes avec un seul levier dont le bras de la puissance serait dix fois plus long que celui de la résistance, on ferait appuyer un second levier semblable sur le premier, au point d'application de la puissance. Il faudrait 200 kilogrammes de puissance sur le premier levier, tandis qu'une puissance de 20 kilogrammes, appliquée sur l'extrémité du second, suffirait pour tenir en équilibre 2000 kilogrammes.

On peut aisément se représenter une suite de leviers appliqués ainsi bout à bout, et n'exigeant, pour soutenir un fardeau

énorme, qu'un poids de quelques grammes ; mais la pratique ne peut accueillir une semblable disposition de leviers.

Ajoutons encore à ce qui précède que l'action perpendiculaire de la puissance sur le bras d'un levier simple, action qui, comme nous l'avons dit, est la plus avantageuse, ne peut avoir lieu, dans cette direction, que pendant un seul instant ; elle s'en écarte incontinent dans le mouvement du levier ; il faut donc arriver à une combinaison moins incommode qu'une réunion bout à bout de leviers droits, et qui permettent à la puissance d'agir toujours à peu près à angle droit, avec son bras de levier.

Les *poulies* fig. 11 et 12, et les *tambours*, fig. 13, peuvent être considérés comme la plus simple des combinaisons de leviers. Les points d'appui sont en B, sur les axes des poulies ou tambours ; la puissance A et la résistance C sont à leurs circonférences, quelles que soient les directions des cordes ou courroies qui les mettent en mouvement. Dans la rotation d'une poulie ou d'un tambour, c'est une suite non interrompue de leviers qui viennent se présenter successivement à l'action de la puissance, et qui ne sont que les diamètres de la poulie ou du tambour.

On voit que pour tenir en équilibre un fardeau au moyen d'une poulie ou d'un tambour, il faut que la puissance soit susceptible d'autant d'effort de masse que la résistance a de masse elle-même, puisque le bras de levier de l'une est le rayon, et celui de l'autre le rayon aussi.

Le seul avantage que, sous ce rapport, une poulie présente, c'est donc de permettre à la puissance d'agir dans une direction favorable, et de faire parcourir un grand espace à la résistance.

A l'aide d'une poulie et d'une corde, un homme soulèvera aisément un certain fardeau, non-seulement à une grande hau-

teur, mais même un fardeau plus considérable qu'il ne le pourrait sans son secours; avec une poulie, il tire de haut en bas, par le concours du poids de son corps; tandis que pour soulever, avec les mains seules, une masse quelconque qu'il aurait à ses pieds, il doit lever, outre la charge, une partie du poids de son corps.

L'emploi d'une poulie ou d'un tambour peut encore donner la faculté de faire agir un cheval, par exemple, suivant la direction la plus favorable; la direction horizontale.

Lorsqu'on veut varier les vitesses, dans la transmission du mouvement-moteur, par des poulies, c'est-à-dire, lorsqu'on veut soulever une grande masse avec une masse plus petite, animée d'une certaine vitesse, il faut combiner ensemble plusieurs poulies, les unes fixes, et les autres mobiles; on appelle cette combinaison *moufle*. Voy. pl. 33, fig. 1.

On démontre, pour le cas d'équilibre, et abstraction faite des frottemens, que, *lorsque les portions de corde qui embrassent les poulies des moufles sont parallèles, le poids moteur est au poids réuni de la moufle et de la masse à mouvoir comme l'unité est au nombre des cordes parallèles*. On voit, sur la figure, qu'il doit y avoir 6 cordes parallèles, et qu'ainsi la masse de la puissance doit être à celle de la résistance comme 1 est à 6.

Les moufles sont employées, comme on sait, à élever ou à traîner de lourds fardeaux : toutefois on ne doit pas trop multiplier le nombre des poulies mouflées, dans le dessein de produire un *grand effet de masse* avec une puissance d'une petite masse; attendu que les frottemens et la résistance des cordes augmentent dans une très-forte proportion, lorsqu'on met plus de quatre poulies dans une même chappe; le fardeau d'ailleurs marcherait avec une excessive lenteur.

La construction et la disposition des poulies mouflées ne

sont point indifférentes : l'expérience a appris qu'une poulie, pour supporter un fardeau de 100 kilogrammes, doit avoir tout au moins 30 millimètres de diamètre ; que le rapport d'épaisseur de la poulie au diamètre doit être comme 1 à 5, et le diamètre du boulon environ le douzième du diamètre de la poulie ; qu'enfin il est convenable de prendre pour la distance des branches parallèles de la chappe, ou pour la longueur du tenon du boulon, les sept sixièmes de l'épaisseur de la poulie. (*Voyez* l'*Art de bâtir de M. Rondelet.*) On a observé aussi qu'il est préférable de fixer l'axe de la poulie, à la poulie même, que de la faire tourner sur un boulon fixé à la chappe.

Ce n'est pas, on le pense bien, à soulever des fardeaux que se borne l'usage des poulies ; la poulie est aussi souvent employée à transmettre le mouvement de rotation, soit dans le même plan, soit dans des plans différens ; et cela s'opère ou au moyen d'une corde, ou avec des courroies, en élargissant et en cannelant le fond rectangulaire de la gorge, pour que la courroie s'y applique exactement ; ou enfin avec des chaînes à la Vaucanson, ou d'autres analogues, en pratiquant sur le contour de la poulie des proéminences qui s'engagent dans les chaînons.

La vitesse du mouvement de rotation transmis par des poulies est proportionnelle à la différence qui existe entre les diamètres respectifs de la poulie qui transmet, et de la poulie à laquelle le mouvement est transmis.

Si donc une poulie de 90 centimètres de circonférence, par exemple, donne le mouvement à une autre poulie de 30 centimètres de circonférence, celle-ci fera *trois tours* pendant que la première n'en fera qu'un.

En effet, la corde qui s'enroule sur toutes les deux, se développant et marchant avec chaque point de la circonférence,

un tour de la plus grande a nécessairement développé une longueur de corde égale à *trois fois* la circonférence de la plus petite, qui, pendant ce temps, a dû faire trois tours sur elle-même.

On voit clairement, d'après cela, avec quelle facilité l'on peut combiner et varier les mouvemens de rotation, sous le double rapport des vitesses et des plans, dans lesquels ils peuvent avoir lieu. On conçoit tout aussi aisément qu'avec une corde *droite* le mouvement de rotation transmis s'opère dans le même sens que le mouvement primitif, et qu'en *croisant* la corde il s'opère en sens opposé.

Pour pouvoir varier à volonté le mouvement de rotation communiqué à une poulie par une autre, on pratique sur l'épaisseur de la poulie motrice plusieurs gorges de diamètres différens; on obtient une rotation plus ou moins vive de la poulie *conduite* suivant la grandeur du diamètre qu'on prend sur la poulie motrice. Cette disposition met dans la nécessité de rallonger ou de raccourcir la corde dans les changemens; c'est quelquefois un inconvénient. On y remédie en construisant l'une et l'autre poulie avec plusieurs gorges de diamètres différens, et en plaçant l'une par rapport à l'autre de manière que le plus petit diamètre de l'une corresponde, par son plan, au plus grand diamètre de l'autre : on varie ainsi à volonté les vitesses respectives de ces poulies en communication.

Si ces diverses gorges, pratiquées sur l'épaisseur d'une poulie, au lieu d'être séparées entre elles par des plans parallèles, se réunissaient en une seule, en se développant en spirale sur un cône, comme on le voit dans les fusées de montre, le mouvement transmis par une poulie de cette espèce varierait à chaque instant, diminuerait ou augmenterait, dans le rapport de la grandeur des tours de la spirale.

Lorsqu'il s'agit de communiquer le mouvement à de très-

petites distances, et avec plus de précision qu'on ne peut l'obtenir d'une corde ou d'une courroie qui glissent souvent sur la gorge des poulies, on a imaginé, de temps immémorial, de pratiquer sur l'épaisseur d'une sorte de poulie des *dents* régulièrement espacées. Or en faisant engrener ensemble les dents de deux poulies de cette espèce, on assujettit rigoureusement l'une au mouvement de l'autre.

On appelle *roues dentées* cette sorte de poulies. On donne le nom de *pignons* aux petites roues également dentées qui en conduisent de plus grandes (voy. plan. 31 fig. 1, 2 et 3); quelquefois le pignon est sur un axe séparé; quelquefois il est lui-même fixé sur l'axe d'une grande roue.

Les dents ne sont pas toujours dans le prolongement des rayons de la roue; elles sont souvent pratiquées ou fixées perpendiculairement à ces rayons (*voyez la grande roue figure* 5); ou bien ces roues sont des cônes tronqués sur les côtés desquels les dents sont formées (*voyez figure* 4), ces roues servant à transmettre le mouvement en divers plans, et on les appelle *roues d'angle*. On remarquera qu'au moyen de ces roues, et d'axes suffisamment prolongés, on peut renvoyer le mouvement non-seulement à d'assez grandes distances, mais encore dans toutes sortes de directions. Ces axes prolongés peuvent être considérés comme les arbres de couche dont il a été question plus haut.

On appelle *lanterne* (figure 5) une espèce de tambour formé par deux plateaux ou tourteaux parallèles, entre lesquels on dispose, parallèlement à l'axe, des petits cylindres ou fuseaux qui engrènent avec la roue dentée.

Les roues dentées représentent, comme les poulies, une combinaison de leviers simples rangés circulairement autour d'un axe; le point d'appui est au centre de la roue; la puis-

sance et la résistance à des points opposés de la circonférence.

Ordinairement c'est un pignon, ou une petite roue d'angle, ou une lanterne, qui communiquent le mouvement à de grandes roues, dentées comme il convient pour l'engrenage réciproque. Le nombre de tours que devra faire la petite roue *conductrice*, pour en faire faire *un* à la grande roue *conduite*, est représenté par le quotient de la division du nombre des dents de la grande roue par le nombre de dents de la petite : ainsi, par exemple, un pignon de 20 dents conduisant une roue de 100, fera cinq tours pendant que cette dernière en fera un.

Quelquefois aussi c'est une grande roue qui en conduit une petite; c'est une roue de 100 dents, par exemple, qui conduit une petite roue de 20; la grande roue fait un tour et la petite en fait 5 dans le même temps.

Ce calcul de vitesse est trop facile pour insister davantage sur ce sujet.

Il n'est pas moins facile non plus de concevoir comment, avec une combinaison de pignons et de roues dentées, l'on peut soulever lentement une grande masse par une petite masse animée d'une certaine vitesse. La différence entre les vitesses respectives de la résistance et de la puissance aux deux extrémités d'un assemblage de roues et de pignons, établit celle qui existe entre les masses respectives de la résistance et de la puissance : ainsi un fardeau de 1000 kilogrammes élevé à un centimètre en une seconde, par un tel assemblage de roues et de pignons, tandis que la puissance parcourt, dans le même temps, avec une manivelle, par exemple, un espace circulaire de 50 centimètres, il est évident que l'effort de masse de la puissance est de 20 kilogrammes.

Dans la transmission du mouvement d'une roue dentée à une autre, il faut nécessairement que les dents de l'une, s'appuyant

sur celles de l'autre, s'engrènent et se désengrènent successivement; si les dents étaient trop longues, et l'espace qui les sépare trop petit pour permettre à chaque dent le développement de la courbe qu'elle doit y décrire pour se désengrener, les dents se briseraient; que si l'espace était trop grand, l'engrenage ballotterait, et chaque dent aurait pu avoir un mouvement dans cet espace, avant de toucher celle sur laquelle elle doit s'appuyer. Il faut donc que l'engrenage soit le plus juste possible, sans que le désengrenage trouve aucun obstacle.

Il faudrait, en outre, que le désengrenage de dents appuyées successivement l'une sur l'autre se fît sans frottement; on la taille pour cela suivant une courbe qu'on nomme *épicycloïde;* mais comme cette courbe n'est jamais matériellement rigoureuse dans l'exécution, le frottement, qui a lieu encore, déforme la dent au bout d'un certain temps, et l'engrenage devient défectueux.

On en est réduit, dans la pratique des machines, à faire les dents les plus petites possibles, eu égard aux diamètres des roues, et à les multiplier en proportion sur les circonférences de ces roues; les dents alors peuvent être à peu près rectangulaires et prennent, en s'usant, une forme plus convenable.

Le meilleur engrenage serait, sans contredit, celui de deux roues sans dents, dont les circonférences appuyées l'une sur l'autre, se transmettraient le mouvement, sans pouvoir glisser aux points de contact; on se sert quelquefois de ce moyen pour de très-petites forces; mais pour des grandes, il faut nécessairement des aspérités et des cavités sur ces circonférences, pour qu'il y ait certitude d'engrenage; or les petites dents dont nous avons parlé ne représentent réellement que des aspérités et des cavités régulières qui empêchent les roues de glisser aux points de contact.

La perfection d'un engrenage consisterait au surplus à communiquer le mouvement sans interruption aucune, et sans frottement. On en approche avec de petites dents, et en prenant la précaution indispensable de disposer les roues et leurs axes de telle manière qu'elles tournent rigoureusement dans les plans dans lesquels elles doivent tourner, sans aucune déviation.

On s'éloigne de cette perfection lorsqu'on fait conduire une trop petite roue par une grande; c'est une disposition qu'il faut éviter autant qu'on le peut; on le peut quelquefois, en plaçant une roue intermédiaire.

Dans une foule de cas, l'emploi des engrenages est indispensable; mais il faut dire que toutes les fois qu'on peut s'en passer, par quelque autre mécanisme, on ne doit pas hésiter à le faire, surtout lorsque le mouvement de ces pièces doit être très-rapide, et destiné à transmettre l'action d'une force un peu considérable.

Nous nous bornons à ce petit nombre de remarques générales sur les engrenages, afin de ne pas dépasser les limites que nous nous sommes tracées dans cet ouvrage.

Les roues dentées, comme les poulies, sont des combinaisons de leviers; le treuil ou le tour peuvent être considérés comme une combinaison de poulies enfilées et fixées entre elles sur un axe. Le point d'appui est au centre, la résistance à la circonférence, et la puissance à l'extrémité *du bras de manivelle*, des *roues* ou des *croisillons* attachés à angle droit à l'axe de ces machines.

On peut dire dès lors que *la puissance agissant perpendiculairement au bras de levier est à la résistance comme le rayon du treuil ou du tambour est au bras de la manivelle, au rayon de la roue motrice, ou à la longueur d'un croisillon.* Et si une corde, soutenant le fardeau, s'enroule sur le treuil, le

rayon de cette corde doit s'ajouter à celui du treuil, et l'on dit alors que *la puissance est à la résistance qui lui fait équilibre, comme la somme des rayons du cylindre et de la corde est au bras de la manivelle ou au rayon de la roue.*

Le *coin* est un prisme triangulaire, ordinairement de bois ou de fer. On conçoit qu'il se rapporte au plan incliné.

Plus le coin est aigu, plus son action devient puissante.

Dans le cas d'équilibre, *la puissance est à la résistance comme la moitié de la base du coin, ou du gros bout, est à sa longueur.*

Si le coin tend à écarter les parties d'un corps dur ayant beaucoup de cohésion entre elles, l'effort qu'il transmet doit toujours aller en augmentant, à mesure qu'il s'enfonce dans ce corps.

La *vis* est un cône fort allongé, ou un cylindre sur la surface desquels on a creusé une gorge en spirale. La partie saillante qui sépare chaque tour de cette gorge s'appelle le filet de la vis; ce filet est triangulaire (voyez planche 33, figure 3), ou carré (figure 2); la distance qu'il y a entre les filets s'appelle *le pas de la vis.*

On forme de même un filet et un pas dans un trou cylindrique que porte un morceau de bois ou de métal qu'on nomme *écrou.*

En général, et abstraction faite des frottemens, qui sont très-considérables dans l'usage des vis, *la puissance est à la résistance comme la hauteur du pas est à la longueur du levier ou au rayon de la roue, attachés à la tête de la vis pour la manœuvrer.*

Plus le pas de la vis est étroit, ou, en d'autres termes, moins il a de hauteur, plus le mouvement est transmis lentement; de sorte que la vis sert principalement lorsqu'il faut produire un

grand *effet de masse* et peu de vitesse, avec un petit *effort de masse* et une grande vitesse.

Dans une presse, par exemple, la résistance ne parcourt qu'un très-petit espace, représenté par la hauteur du pas de la vis, pendant que la puissance décrit un grand cercle à l'extrémité de la barre ou levier de cette espèce.

On appelle *vis sans fin* celle dont le filet engrène dans une roue dentée.

CHAPITRE V.

Des transformations du mouvement moteur.

Les pièces qui entrent dans la composition des mécanismes de transformations du mouvement moteur sont les mêmes que celles dont se composent ou peuvent se composer ceux de transmission dont nous venons de parler; il s'agit seulement ici de considérer ces pièces sous un second point de vue.

Il n'y a, à parler rigoureusement, que deux genres de mouvement dont on se serve dans les opérations mécaniques, ce sont : le mouvement *rectiligne*, et le mouvement *circulaire* ou de *rotation*. On voit que nous confondons tout naturellement la direction avec le mouvement, pour simplifier nos expressions.

Le mouvement circulaire est bien plus généralement employé que le rectiligne, parce que le premier peut se continuer long-temps, autant qu'on le veut, dans le même sens, et que

le second doit revenir promptement sur lui-même, à moins de supposer un très-grand espace qu'une machine ne peut pas embrasser. De plus, toutes les pièces qui composent un mécanisme devant être fixées et soutenues sur des points déterminés, elles décrivent, en se mouvant autour de ces points, des cercles ou des portions de cercle.

Le mouvement circulaire peut être continu comme celui d'un tambour d'arbre de couche, ou de *va et vient* comme celui de la poulie d'un foret, mû par un archet, et faisant plusieurs tours avant de revenir sur elle-même; ou d'un balancier, qui ne décrit que des arcs de cercle.

On appellera, si l'on veut, mouvement rectiligne continu celui d'un fardeau qu'on élève au moyen d'une corde; et mouvement rectiligne de va et vient, celui d'un piston de pompe, etc.

Ces deux genres de mouvemens peuvent avoir lieu dans une infinité de plans différens; ils peuvent être accélérés, retardés, etc., etc., etc. Or il est aisé de comprendre comment, en combinant deux à deux, trois à trois, etc., ces genres de mouvemens, on peut produire toutes les sortes de mécanismes que l'on peut imaginer.

L'action des moteurs qui, *seule*, donne la vie à ces mécanismes divers, est, ainsi que nous l'avons déjà remarqué, toujours en ligne droite, ou tend du moins à imprimer un mouvement rectiligne; à quoi il faut ajouter qu'on n'est pas le maître, en toutes circonstances, de diminuer ou d'augmenter la vitesse ou la puissance de cette action, ou de déterminer la direction dans un plan donné, sans opérer des transformations. C'est donc par la forme, par la disposition que nous donnons à divers mécanismes que nous transformons, que nous décomposons le mouvement moteur, de manière à produire cette prodigieuse

quantité d'effets de mouvemens dont l'industrie a besoin pour arriver à ses fins.

C'est donc entre la puissance et la résistance, ou plutôt entre le mouvement primitif du moteur et le mode d'exécuter le travail mécanique industriel, qu'a lieu ce jeu admirable de mouvemens décomposés, modifiés, accumulés, combinés de toutes les façons, transmis dans tous les sens, et concourant tous à un effet unique, ou à plusieurs effets semblables, analogues, ou essentiellement différens. C'est la main de l'homme que ces mécanismes représentent, mais la main de l'homme douée d'une puissance et d'une adresse toute nouvelles et quelquefois surprenantes.

Il est permis de penser qu'en général ces dispositions de mécanismes, que ces formes diverses qu'on leur applique, que les combinaisons dont ils sont susceptibles, pourraient se prêter à l'exécution de tous les projets mécaniques que l'imagination peut enfanter. Cependant, pour une opération qui exige le concours de mouvemens ou *d'effets manuels*, dont la variation ne peut pas être prévue, et ne doit point avoir lieu dans des momens précis, dans des circonstances susceptibles de détermination ; lorsque c'est à l'intelligence et à une attention continuelle qu'il appartient de la produire, suivant les besoins éventuels, ce serait en vain qu'on chercherait à imaginer des mécanismes qui pussent exécuter une opération de cette nature.

Ainsi, par exemple, il paraît qu'on se placerait hors des limites de la science, si l'on cherchait à imaginer une machine pour remplacer l'action de la main, qui efface les inégalités des fils de laine sur le métier à filer, ou pour ôter sur le drap ce qu'on en enlève, par l'opération du *noppage*.

Mais toutes les fois qu'il s'agit de produire des mouvemens dont les variations sont ou régulières ou seulement susceptibles

d'une détermination précise, et qu'on peut rattacher à quelques circonstances même éventuelles, on peut, en général, les obtenir par quelques mécanismes et remplacer la main de l'homme.

Donnons maintenant quelques exemples de diverses transformations qu'on peut faire subir aux deux genres de mouvemens dont il vient d'être question.

Mouvement rectiligne, dans un plan, produisant le rectiligne dans un autre plan, ou dans le même plan, mais en sens opposé.

PLANCHE XXXII.

Premier exemple. Fig. 1. Plan incliné A se mouvant sur un autre B, et faisant élever et baisser la pièce C, assujettie latéralement dans les deux coulisses *a*, *a*, et portant un galet *b*, pour diminuer le frottement sur le plan.

Le mouvement rectiligne du plan se fait de *e* en *é* et réciproquement; et celui de la pièce C de *f* en *f* et réciproquement.

Deuxième exemple. Fig. 2. Deux pièces droites A et B parallèles et liées à articulations par deux autres C et D, de longueur égale.

En imprimant un mouvement rectiligne à la règle B, par un point quelconque pris sur sa longueur, la règle A recevra ce mouvement dans le même plan, mais en sens opposé. La règle B allant, par exemple, de *a* en *à*, la règle A ira de *b* en *b'*.

Mouvement rectiligne produisant le mouvement par arcs de cercle.

Premier exemple. Fig. 3. Arbre vertical A portant à angle droit un secteur B, sur lequel une corde *a* se plie, et à la partie supérieure, un levier C, auquel on attache une bielle horizontale D.

En imprimant un mouvement rectiligne de va-et-vient à cette

bielle D, articulée au point *b* du levier C, le secteur B décrit des arcs de cercle alternatifs, avec l'arbre vertical A monté, comme on le voit, sur un pivot *c*.

Deuxième exemple. Fig. 4. Levier angulaire A B, fixé au cylindre *aa*, comme centre de mouvement, et manœuvré par la corde *b*; une bielle horizontale C établit une communication entre le levier angulaire A B, et le levier horizontal D, fixé au cylindre vertical E, comme centre de mouvement. Par ce mécanisme, le mouvement rectiligne de la corde, dans le plan vertical, produit sur le levier D le mouvement par arcs de cercle, dans le plan horizontal.

Troisième exemple. Fig. 5. Arbre horizontal A, auquel est attaché à angle droit le levier C manœuvré par la bielle D, articulée au point *b*. B secteur placé perpendiculairement sur l'arbre horizontal A; le mouvement rectiligne de la bielle D, dans le plan horizontal, imprime au secteur B un mouvement par arcs de cercle dans le plan vertical.

Mouvement rectiligne produisant le circulaire alternatif.

Premier exemple. Fig. 6. Corde A enroulée sur un arbre B vertical ou horizontal, et tirée par deux puissances opposées, placées en *a* et *a'*.

Le mouvement rectiligne de ces deux puissances, fait faire plusieurs révolutions à l'arbre B, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

Deuxième exemple. Fig. 7. Levier A dont le point d'appui est en *a*, armé d'une portion de cercle dentée B, engrenant avec un petit pignon C; en manœuvrant le levier A par une corde ou une bielle, le mouvement rectiligne du moteur fait faire plusieurs tours au tambour D, tantôt dans un sens, tantôt dans un sens opposé.

Troisième Exemple. Fig. 8. Pièce cylindrique A à laquelle le mouvement rectiligne de va-et-vient des deux règles parallèles B et D imprime le circulaire alternatif.

Mouvement rectiligne produisant le circulaire continu.

Premier exemple. Fig. 9. Bielle A imprimant le mouvement de rotation à la manivelle B dont le centre de mouvement est en *a*.

Cette bielle doit être très-longue, pour que la direction de la puissance à son point d'application ne s'écarte qu'insensiblement du mouvement rectiligne.

Deuxième exemple. Fig. 10, et pl. 34, fig. 5. Roue à rochets A tournant toujours dans le même sens, au moyen du cliquet C que le levier B fait avancer et reculer pour pousser la roue A.

Le mécanisme, fig. 10., pl. 33, produit le même effet, mais il est sans denture.

a. Arbre sur lequel sont fixés les plateaux de l'encliquetage.

b. Roue tournant librement sur l'arbre *a* ; elle est retenue d'un côté par le premier plateau, et de l'autre par une bague goupillée sur l'arbre.

c. Les plateaux de l'encliquetage.

d. La griffe.

e. Pièce fixée par une de ses extrémités à la queue de la griffe, de manière à former une articulation; et de l'autre à la roue *b*, par une cheville fixée sur cette roue et formant un petit axe sur lequel cette pièce peut tourner.

f. Ressort servant à appliquer constamment le chevilles de la griffe contre les bords relevés des plateaux.

On a supposé, dans l'élévation, que le premier disque ou plateau est enlevé.

Troisième exemple. Fig 11. Bielle A portant une roue dentée B, qui engrène avec une autre roue dentée C fixée au centre du volant D. Cette bielle est attachée à un balancier E, mû par la tige du piston d'une machine à vapeur. La roue dentée B circulant autour de la roue C détermine le mouvement de rotation du volant; mouvement dans lequel le rectiligne du piston est transformé.

Quatrième exemple. Planc. 33. Fig. 9. Bielle A articulée au point *a* hors du centre de la roue B, à laquelle cette bielle, mue par un mouvement rectiligne, communique le circulaire continu.

Ce mécanisme opère aussi la transformation du mouvement circulaire continu de la roue B en rectiligne alternatif par la bielle A. Les points *a*, *b*, *c*, *d*, sont, comme on le voit, à différentes distances du centre de rotation, et peuvent servir chacun de points d'attache à la bielle. La longueur du mouvement de va-et-vient dépend du point auquel la bielle est assujettie; et ce mouvement est d'autant plus court que le point est plus près du centre de la roue B.

Cinquième exemple. Planc. 34. Fig. 1. A tige du piston d'une machine à vapeur, se mouvant en va-et-vient rectiligne, et communiquant le mouvement circulaire continu au volant de la machine, par l'intermédiaire du balancier B, oscillant sur son centre de mouvement *b*, et de la bielle C dont on ne voit qu'une partie sur la figure.

Le balancier B, en oscillant sur son centre *b*, décrit nécessairement l'arc de cercle ponctué *m o*, et si la tige A du piston était immédiatement fixée à l'extrémité *n* du balancier, elle devrait suivre la direction de ce point, et fléchir ou s'incliner vers le centre *b* du balancier.

Pour remédier à cet inconvénient grave, on a imaginé de pla-

cer comme intermédiaire entre l'extrémité *c* de la tige et l'extrémité *n* du balancier, une espèce de parallélogramme composé des pièces *d*, *e*, *f* et *g*, unies ensemble à articulation.

La pièce *d* est la seule dont une des extrémités, qu'on voit en *k*, soit attaché sur le bâti de la machine; les autres pièces du parallélogramme sont mobiles sur tous leurs points et peuvent prendre diverses positions à droite et à gauche.

Lorsque le balancier est dans la position horizontale, son extrémité *n* est au point *y*, et ce point est rigoureusement dans la direction de la ligne verticale que décrit la tige A du piston; mais lorsque le balancier s'abaisse pour prendre la position B *n*, il ramènerait vers son centre *b*, l'extrémité *c* de la tige du piston, si la pièce *d*, unie à cette extrémité par l'intermédiaire de la pièce *f*, ne repoussait ou plutôt n'attirait le sommet *c* de la tige autant en dehors que le mouvement du balancier tend à l'incliner en dedans. Il en est de même quand le balancier prend la position *B o*.

Ainsi donc, dans toutes les positions de ce balancier, la pièce *f*, constamment soutenue par la pièce *d*, assujettie comme nous l'avons dit au point *k*, reste toujours parallèle à l'axe longitudinal *l n* du balancier; et dès lors l'extrémité *c* de la tige à laquelle cette pièce *f* est unie ne peut s'écarter sensiblement de la ligne verticale que suit le mouvement du piston.

Sixième exemple. Même planche, fig. 2. Balancier B dont le centre de mouvement *b* est mobile sur le point *c*. *d* pièce fixée en *k*, articulée au point *m* du balancier et servant à maintenir la tige A dans une direction verticale, lorsque le balancier oscille sur son centre de mouvement. Ce centre de mouvement est autant ramené vers la verticale *n o* par la pièce

d, que l'extrémité *e* du balancier tend à l'en écarter en décrivant un arc de cercle.

Mouvement par arcs de cercle produisant le rectiligne.

Premier exemple. Planc. 33. Fig. 12. Règle AA, dentelée à rochets, pouvant glisser dans une rainure horizontale, se mouvant en ligne droite, par le levier de Langaroust BB, animé d'un mouvement par arcs de cercle sur le point d'appui *a*.

Deuxième exemple. Fig. 13. A, arc de cercle denté, engrenant dans une crémaillère B, et imprimant le mouvement rectiligne à la règle *a a*.

Troisième exemple. Planc. 34. Fig. 4. Corde enroulée sur un tambour A et sur deux poulies de renvoi *a a*. le levier B décrit des arcs de cercle et produit le rectiligne alternatif sur la portion de corde *b b*.

Mouvement par arcs de cercle produisant le circulaire continu.

Cette transformation peut être opérée par les mécanismes représentés fig. 10, pl. 32; fig. 10, pl. 33; fig. 5, pl. 34. L'extrémité des leviers décrit des arcs de cercle.

Mouvement circulaire continu produisant le rectiligne de va-et-vient.

Premier exemple. Planc. 34. Fig. 6. Axe coudé A sur lequel on attache des bielles aux points *a* et *a'*; le mouvement de rotation continu de cet axe, portant un volant B, détermine le mouvement rectiligne de va-et-vient de la bielle attachée à chaque coude.

Deuxième exemple. Même planche, fig. 7. Ovale A, tournant sur un axe *a*, et portant sur son pourtour une rainure qu'on voit ponctuée, et dans laquelle roule un galet *b* attaché au contre-poids C. La rotation de cet ovale fait aller et venir en ligne droite le contre-poids, lequel transmet le mouvement rectili-

gne par la corde D et dans le plan qu'on veut, par l'intermédiaire d'une poulie de renvoi *d*.

Troisième exemple. Même planche, fig 3. Roue A à denture intérieure, ayant un diamètre double de la roue B. Cette dernière peut tourner sur un petit axe *a*, placé perpendiculairement sur la manivelle *cc'*; elle porte un goujon *e* fixé solidement sur sa circonférence. En faisant tourner la manivelle *cc'* sur son centre de mouvement *d*, la roue B parcourt le cercle intérieur denté de la roue A, et le goujon *e* se promène, va et vient sans dévier, dans la direction du diamètre vertical de la roue A; et le rectiligne alternatif est produit.

Quatrième exemple. Pl. *idem*. Fig. 9 Arbre A armé de mentonnets *a*, *a*, sur une portion de sa circonférence; il est placé dans un châssis ovale BB portant latéralement des toquets *b b*. Le mouvement circulaire de l'arbre A le faisant engrener tantôt avec un des côtés du châssis, tantôt avec l'autre, produit aux deux extrémités CC du châssis le mouvement rectiligne de va-et-vient.

Cinquième exemple. Pl. *id.*, fig. 8. La seule différence qu'il y ait entre ce mécanisme et le précédent consiste en ce que l'arbre est remplacé par un axe portant un demi-cercle denté A, engrenant alternativement dans sa rotation avec les deux crémaillères *bb* du châssis BB.

Sixième exemple. Pl. *id.*, fig. 10. *a*, petit pignon dont l'axe peut se porter de *d* en *d*, en s'engrenant sans interruption avec la denture intérieure du châssis BB, auquel il communique le mouvement rectiligne de va-et-vient aux deux extrémités CC.

Septième exemple. Pl. *id.*, fig. 11. Excentrique A, dont le centre de mouvement est en *b*; il doit rester constamment appuyé sur un levier B, dont le point d'appui est en *c*. En

tournant, il produit sur une corde ou sur une bielle à l'extrémité *e* du levier, le mouvement rectiligne alternatif.

Huitième exemple. Pl. *id.*, fig. 12. Disque incliné *a a* fixé sur un arbre B; règle C glissant dans une rainure portant un galet *c*, et restant constamment appuyée par un ressort ou par quelque autre moyen sur la surface du disque. Celui-ci en tournant fait aller et venir en ligne droite la règle C.

Neuvième exemple. Pl. *id.*, fig. 13. Le cylindre A, sur la surface duquel on a creusé une double gorge en hélices *a a*, peut communiquer, en tournant, le rectiligne à une pièce engagée sans frottement dans cette gorge.

Dixième exemple. Pl. *id.* fig. 14. Roue à ondes A sur l'épaisseur de laquelle un levier B reste constamment appuyé, et produisant le même genre de transformation que le mécanisme de la fig. 11.

Onzième exemple. Pl. *id.*, fig. 15. V A tournant dans un écrou *a* porté par un support glissant dans une rainure droite *b b*. La rotation de cette vis imprime le mouvement rectiligne à son écrou et à la pièce qui est attachée à celui-ci. Mais le rectiligne n'est alternatif qu'en tournant et en détournant la vis.

Les cames *a, a, a* fixées sur les arbres A, A (pl. 33, fig 4 et 5) peuvent produire le mouvement rectiligne alternatif ou le mouvement par arcs de cercle, par l'intermédiaire de leviers, sur une des extrémités desquels ces cames appuieraient successivement par la rotation de l'arbre.

L'excentrique curviligne C, pl. 23, fig. 6, et l'excentrique circulaire A, fig. 7, ainsi que le *cœur* B, fig. 8, produisent aussi, par l'intermédiaire de leviers ou de pièces, sur lesquels ils s'appuient en tournant, les mêmes transformations que ci-dessus, avec des variantes dans les mouvemens produits, dont il est très-facile de se rendre compte sans que nous ayons besoin

d'entrer dans des détails qui nous entraîneraient beaucoup trop loin, et qui, pour la plupart des lecteurs, seraient par trop fastidieux.

CHAPITRE VI.

Des modifications du mouvement moteur.

Nous entendons par modification du mouvement moteur, les moyens spéciaux de le régulariser, de l'accumuler, de l'accélérer, de le retarder, de le suspendre, etc., etc.

La force motrice peut être rarement considérée comme une suite non interrompue de pressions ou d'impulsions égales dans tous les instans; et il arrive souvent que le travail ne présente pas non plus, dans tous les instans, le même degré de résistance. Dans l'un et dans l'autre cas, il faut fondre, s'il est permis de parler ainsi, les pressions fortes avec les pressions faibles des moteurs, ou les degrés différens de résistance que présente le travail, afin d'obtenir un mouvement régulier. Le volant a cette propriété.

C'est donc pour régulariser et même pour rendre continue l'action légèrement intermittente de la vapeur, que nous avons vu l'emploi d'un volant dans le mode d'application de ce moteur; c'est ainsi encore qu'un volant est appliqué utilement à une manivelle mise en mouvement par la force des hommes. On sait que ceux-ci ne tournent jamais ce qu'on appelle rondement, et qu'ils tendent toujours à abaisser le bras de la manivelle avec plus de vitesse qu'ils ne le font remonter.

Quant au travail, il présente quelquefois une force de résistance fort irrégulière, le laminage des métaux, par exemple, le jeu d'une pompe aspirante, etc. La fonction du volant est d'accumuler la force motrice dans les instans de moindre résistance et de faire servir cette accumulation de force à vaincre un surcroît de résistance qui survient dans d'autres instans. Il fait ici pour le travail ce que nous en disions ci-dessus au sujet des moteurs.

On sait que le volant est ou une roue de fonte d'un grand diamètre ou de simples rayons de roue, sans jantes, chargés l'une à la circonférence, et les autres à leurs extrémités, de poids plus ou moins lourds. Il doit être disposé de manière à tourner fort librement sur les tourrillons de son axe; et en général toutes les parties qui le composent doivent être parfaitement en équilibre sur cet axe.

Nous disons en général, car on charge quelquefois une portion de sa circonférence plus que l'autre, et notamment dans quelques machines à vapeur à simple effet. Un volant de cette espèce est placé de manière que sa portion de circonférence la plus lourde soit toujours arrivée au point de descendre, lorsque l'action du moteur est suspendue; le volant agit alors sur le piston pour le faire descendre en vertu de la force qu'il a accumulée dans les instans précédens.

Le volant, à la première impression d'un moteur quelconque commence à tourner, et ayant comme tous les corps ronds la propriété de conserver pendant un certain temps le mouvement de rotation qu'il a pris, il transmet sans discontinuité aux pièces qui le suivent dans la composition d'une machine, le mouvement que lui communique le moteur.

Toutefois il faut bien se garder de croire, d'abord que le volant ait une force indépendante du moteur, et ensuite qu'il

ait la propriété de conserver long-temps la force reçue. Les frottemens de ses tourillons, la résistance de l'air tendent incessamment à détruire l'effet de cette force; et s'il suit, dans son mouvement, l'accroissement de l'action du moteur, il en suit aussi le décroissement lorsqu'elle s'affaiblit pendant un temps d'une durée plus grande que celui pendant lequel un volant pris isolément peut conserver son mouvement.

Un volant n'ajoute donc *absolument rien* à la somme des impulsions ou pressions successives d'un moteur : il ne fait qu'en régulariser l'effet, ou bien il transmet en un instant une suite d'efforts que le moteur a exercés sur lui dans un temps d'une certaine durée; s'il semble alors en augmenter l'énergie, c'est qu'il dépense en une fois ce qu'il a reçu du moteur en plusieurs fois.

Lorsqu'il s'agit de régulariser l'action d'un moteur, par un volant, il faut, en général, placer celui-ci le plus près possible de celui-là; et lorsqu'on a le dessein de régulariser la résistance du travail, il faut placer le volant le plus près possible des pièces qui exécutent ce travail.

Quant au poids du volant, dont on porte la plus grande partie sur la circonférence, il doit être proportionnel à la grandeur de la force qu'il doit recevoir et transmettre; il ne semble pas qu'il y ait, rigoureusement parlant, des règles fixes à établir sur ce point; et quant au diamètre du volant, il est ordinairement en raison inverse de la vitesse avec laquelle il doit tourner. Le professeur Busch, de Hambourg, dans son traité de mécanique intitulé : *Die Mechanik zum nutzen und Vergnügen des burgerlichen lebens*, prétend que le rayon d'un volant doit avoir la même longueur qu'un pendule qui aurait naturellement la même vitesse que celle dont le volant sera animé par le moteur.

Nous avons dit plus haut que le volant peut servir à accu-

muler plusieurs degrés de force imprimés successivement par un moteur; les ressorts, de quelques nature qu'ils soient, ont la même propriété; ainsi une lame d'acier trempé, bandée, de l'air refoulé par l'action successive d'une force, accumulent cette force et peuvent la déployer toute à la fois, dans un seul instant, ou dans plusieurs instans consécutifs.

Enfin, un contre-poids qu'on élève partage avec le volant et les ressorts la même propriété.

Autres mécanismes destinés à modérer le mouvement.

PLANCHE XXXV.

Premier exemple. Fig. 7. Pendule conique de Watt et Boulton, employé pour modérer le mouvement des machines à vapeur.

a b. Arbre vertical portant une poulie *c* sur laquelle une corde s'enroule, ainsi que sur une autre poulie enfilée sur l'axe du volant de la machine à vapeur. Cet arbre tourne sur lui-même par l'action du volant, et lorsque la vitesse de celui-ci dépasse le degré qu'elle doit avoir, les deux boules de métal *d d*, attachées aux extrémités des leviers *e e* s'écartent et, changeant la forme du quadrilatère *m n o p*, font baisser le pièce *y*, qu'on met en communication par un levier avec la soupape à gorge du conduit d'admission de la vapeur, pour en rétrécir le passage. Mais lorsque la vitesse du volant vient à diminuer, la vitesse de l'arbre *a b*, diminuant aussi, les boules se rapprochent, le quadrilatère s'allonge et relève la pièce *y*, pour rouvrir la soupape à gorge.

Deuxième exemple. Fig. 6. Mécanisme de Robert Fulton; il est analogue au précédent et produit les mêmes effets. On voit ici en *k* le levier attaché au canon *y*. Les mêmes lettres désignent les mêmes objets.

Troisième exemple. Fig. 7. Autre mécanisme analogue. Arbre vertical *a b* mis en mouvement de rotation par la poulie *c* ; il porte un globe *d d* formé de lames élastiques et minces ; ces lames sont fixées à l'arbre vertical au point *e* et sont attachées en *y*, à une espèce de canon enfilé sur l'arbre *a b* ; un levier *k* à fourchette embrasse ce canon.

Lorsque l'arbre *a b* tourne d'un mouvement trop rapide, le globe se renfle et soulève le canon *y* et le levier *k*, pour produire le même effet que les mécanismes précédens. Si le mouvement se ralentit, le globe se désenfle et fait descendre le canon *y* et son levier.

Quatrième exemple. Fig. 8. Une seule boule centrifuge *d* fait monter et descendre le canon *y* par le levier *e*, et produit l'effet des mécanismes ci-dessus. Les mêmes lettres désignent du reste les mêmes objets ou les objets analogues.

Mécanismes pour accélérer ou retarder le mouvement.

PLANCHE XXXV.

Premier exemple. Fig. 10. Deux cônes tronqués *a* et *b* dont les axes sont parallèles ; la petite base *c* de l'un correspondant à la grande base *d* de l'autre. Ces cônes portent des gorges circulaires ou en hélices, et l'un conduit l'autre par une corde ou courroie *e*. On conçoit, ainsi que nous en avons déjà fait mention plus haut, qu'en changeant la place de la corde, on varie à volonté la vitesse du mouvement communiqué.

Deuxième exemple. Fig. 11. La pièce *a*, armée d'un galet *b*, pose sur la spirale *r r r*, dont le centre de rotation est en *c*. Le mouvement de cette pièce *a* s'accélère à mesure que le point de la courbe sur lequel elle pose s'éloigne du centre de mouvement *c*, et se retarde dans le cas contraire. Comme la forme de cette

courbe peut varier à l'infini, les modifications de mouvement dont il s'agit peuvent varier de même.

Mécanismes destinés à suspendre la communication du mouvement moteur.

PLANCHE XXXV.

Premier exemple. Fig. 4. *ab*, arbre à l'embase *c* duquel est fixée la poulie *d*; *e*, autre poulie tournant *librement* sur le même arbre. Lorsque la corde ou courroie est enroulée sur la poulie *d*, l'arbre *ab* tourne en recevant le mouvement du moteur; et lorsqu'on veut arrêter le mouvement de cet arbre, on fait glisser la corde sur la poulie *e* qu'on appelle *poulie folle*, et l'arbre *ab* ne tourne plus, parce que cette poulie *e* tourne librement sur l'arbre sans lui communiquer le mouvement qu'elle reçoit du moteur. Ce mécanisme est principalement employé dans les métiers d'étirage pour la filature.

Deuxième exemple. Fig. 1 et 5 L'arbre *a b* peut être considéré comme formé de deux parties distinctes, savoir, *ac* et *db*. La partie *ac* est une sorte de tuyau dans lequel entre la partie *db*, et qui est mis en mouvement par le moteur. On voit deux manchons dentelés *m* et *n*, dont l'un est fixé solidement sur le bout de l'arbre *ac*, tandis que l'autre peut glisser par une rainure pratiquée sur la partie *db* de l'arbre; ces deux manchons sont destinés à s'engrener l'un dans l'autre par l'action du levier à fourchette *f*, lorsqu'on veut déterminer le mouvement de la partie *db* de l'arbre, et à se désengréner par le même levier lorsqu'on veut en suspendre le mouvement.

Troisième exemple. Fig. 2. Mécanisme analogue au précédent. On voit deux cônes *m* et *n* pouvant s'emboîter l'un dans l'autre, à frottement dur, le premier étant creux, et se désenboîter par un levier à fourchette, venant, comme ci-dessus

embrasser la pièce *n* au point *o*. Le cône *n* glisse à rainure sur la portion d'arbre *d b*. On conçoit que les cônes une fois emboîtés, tout le système marche ; mais que, désemboîtés, le côté *a c* ou le côté *d b*, suivant le point d'application du moteur, se meut exclusivement.

Quatrième exemple. Fig. 3. Autre mécanisme analogue au précédent. L'arbre *a b* porte deux roues d'angle *p* et *q*, tournant librement autour de cet arbre, et engrenant avec une autre roue d'angle *r*. Deux manchons accouplés *m*, *n* glissent à rainure sur l'arbre *a b* ; on voit en *y y y y* des saillies, tant sur les manchons que sur les roues d'angle *p* et *q*. Lorsqu'on veut que la roue d'angle *p* communique le mouvement à la roue *r*, on engage le manchon *m* par ses saillies, comme on le voit sur la figure, par le moyen d'un levier appliqué au point *o*, comme ci-dessus ; car alors le manchon *m* fixe la roue *p* à l'arbre tournant *a b*, tandis que la roue *q* tourne librement sur l'arbre.

Si au contraire on engage le manchon *n* avec la roue *q*, la roue *p*, dégagée, tourne librement, à son tour, sur l'arbre, et c'est la roue *q* qui fait tourner et en sens contraire la roue d'angle *r*.

Ce mécanisme peut non-seulement servir à suspendre le mouvement, mais encore à l'arrêter dans un sens, pour le porter à l'instant même dans l'autre sens.

CHAPITRE VII.

Conclusion du second livre.

Nous venons de voir que l'objet du second livre est de porter à différentes distances, et en diverses directions, de transformer et de modifier le mouvement qui nous vient immédiatement du moteur.

Pour produire ces effets, il suffit de combiner ensemble certaines pièces matérielles, inertes par elles-mêmes, auxquelles on donne toutes sortes de formes et de dispositions appropriées au but qu'on se propose.

En dernière analyse, ces pièces, quelles qu'elles soient, peuvent être considérées comme des leviers simples, ou comme des assemblages plus ou moins compliqués de leviers; et il résulte de là et de la théorie du levier que nous avons exposée, que non-seulement on transmet, on transforme, on modifie un mouvement donné, mais encore qu'on change la vitesse primitive; c'est-à-dire qu'on fait une nouvelle répartition des deux élémens de la force motrice, masse et vitesse, en produisant à volonté ou un grand effet de masse, ou un grand effet de vitesse, sans rien ajouter toutefois à la force primitive qu'on n'a fait que décomposer, pour recomposer avec de nouvelles proportions de ses élémens.

Les mécanismes destinés à opérer ainsi sur le mouvement moteur ont été présentés, chacun isolément, dans les chapitres précédens, et suivant leurs services respectifs; nous en réunissons un certain nombre dans la planche 36, pour montrer comment on peut les faire agir de concert.

On voit en A une roue hydraulique sur l'arbre de laquelle est fixée une roue dentée B; le mouvement de rotation continu de cette roue, dans le plan vertical, est le *mouvement moteur;* il s'agit de porter ce mouvement partout, dans les divers ateliers dont se compose le bâtiment, avec les divers changemens que les travaux sont supposés exiger.

L'arbre de couche horizontal *a b* porte 1°. un pignon *a'*; 2°. une poulie *b'*, et 3°. une roue d'angle *a''*. Le Pignon *a'*, engrenant avec la roue motrice B d'un plus grand diamètre, imprime un mouvement plus rapide que celui du moteur à l'arbre de couche *a b*, mais toujours dans le plan vertical; il n'y a de changé jusqu'ici que la vitesse.

Une courroie s'enroule sur la poulie *b'*, et porte le mouvement de rotation dans le plan vertical encore, mais avec plus de vitesse, au premier étage, à l'axe C, par la poulie *c*.

Cet axe C porte d'un côté un treuil D, qui au moyen d'une corde convertit son mouvement de rotation en rectiligne; de l'autre côté, l'axe est combiné avec un double joint universel E, et transmet de biais son mouvement, à quelque distance, à deux espèces de tambours *e* et *e'*, roulant l'un sur l'autre.

L'axe du tambour *e* porte une poulie *e''* qui, au moyen d'une petite poulie de renvoi et d'une corde qu'on voit sur la figure, imprime un mouvement de rotation dans un plan perpendiculaire aux mouvemens précédens.

Mais revenons à l'arbre *a b* qui seul vient déjà d'opérer dans un atelier du premier étage ces divers effets de mouvement. Sa roue d'angle *a''* s'engrène avec une autre grande roue d'angle F, à laquelle elle communique aussi le mouvement de rotation dans un plan perpendiculaire au sien, avec une vitesse différente de la sienne.

Cette roue d'angle F, au moyen du pignon d'angle *f*, donne

un mouvement circulaire dans le plan horizontal aux meules qu'on suppose renfermées en G.

Ce ne sont pas là les seules fonctions de la roue F, au moyen du pignon d'angle *d*, fixé sur l'arbre de couche *ce*, et prenant aussi le mouvement sur la roue F, l'arbre de couche *c e* va transmettre et transformer le mouvement de diverses manières, savoir :

1°. Avec le coude *g* et la bielle qui lui est attachée, ainsi qu'elle l'est à la manivelle *g'* le mouvement de rotation est porté au second étage.

2°. Avec la roue d'angle *h*, l'arbre incliné H donne le mouvement circulaire horizontal au point *i* et vertical au point *k*.

3°. Avec la poulie *l*, il transmet son mouvement de rotation avec plus de vitesse au point *m*; et avec le pignon d'angle *n*, le même mouvement à l'arbre vertical M, coudé en *o* et produisant, d'une part, en *p*, le mouvement rectiligne de va-et-vient, et d'autre part, en *q*, le mouvement de rotation dans le plan horizontal.

4°. Enfin avec la roue d'angle *r*, l'arbre de couche *ce* transmet le mouvement circulaire dans un plan incliné à l'horizon, au point *s*, par l'intermédiaire de l'axe vertical T, portant une poulie *t* et un pignon d'angle *u*.

Tels sont les changemens, les décompositions, les transmissions en sens divers, les transformations que le mouvement circulaire, dans le plan vertical de la roue motrice B, subit au moyen d'un petit nombre de mécanismes que nous avons agglomérés, comme une sorte de résumé du second livre.

LÉGENDES.

PLANCHE X.

Moulins à vent ordinaires.

Fig. 1. Élévation et coupe verticale.

A, surface gauche des ailes.

B, axe de rotation.

C, roue d'engrenage pour communiquer le mouvement au travail.

D, corps du moulin. *E*, arbre vertical sur lequel il tourne en s'appuyant sur l'embase *F*.

G, levier pour l'orienter.

H, escalier du moulin.

Fig. 2. Vue de face d'une portion des ailes.

Fig. 3. Élévation et coupe verticale d'un autre moulin.

Les mêmes lettres désignent les mêmes objets que sur la figure précédente.

Ce moulin diffère du précédent, en ce que le toit *h* seul, est mobile sur la plate-forme *m* : il roule sur deux rangées circulaires de galets, les uns uns placés verticalement (voyez *i*, fig. 4), les autres horizontalement, comme on le voit en *o*.

PLANCHE XI.

Moulin à vent à la hollandaise.

Fig. 1. Vue de face de ce moulin.

A, ailes du moulin.

B, axe incliné de rotation.

C, corps du moulin en bois.

D, Galerie circulaire pour communiquer avec l'intérieur du moulin.

E, *F*, plate-forme et galets sur lesquels le corps du moulin tourne.

Fig. 2. Vue de profil de ce moulin.

G, treuil pour orienter le moulin.

PLANCHE XII.

Moulin à vent à ailes verticales s'orientant de lui-même, et se déshabillant progressivement, à mesure que la vitesse de rotation augmente.

Fig. 1. Coupe du moulin.

A, ailes motrices.

B, petit moulin orienteur. Lorsque ce moulin, dont le plan est perpendiculaire à celui des ailes motrices, est en prise au vent, il tourne et communique comme on le voit le mouvement au genou de cardan *a*, qui le communique à son tour au pignon *C*, par l'intermédiaire de la roue *L*; ce pignon engrène avec une grande roue de champ que porte la plate-forme du moulin, ce que l'on voit clairement dans le détail fig. 2; et la calotte *D* du moulin s'oriente avec les ailes motrices. Aussitôt que celles-ci sont au vent, on conçoit que le moulin orienteur, par la situation relative de son plan, cesse de tourner, jusqu'à ce que le vent change et le remette en position d'agir de nouveau sur la plate-forme mobile du moulin principal : voilà pour ce qui regarde la manière dont ce moulin s'oriente. Voyons maintenant comment il se déshabille, lorsqu'il tend à prendre trop de vitesse.

Les ailes sont composées de deux barres fixes *b*, servant de coulisses à deux autres barres *F* qui portent les cylindres *E*, autour desquels s'enroulent, plus ou moins, des morceaux de toile qui forment la voile : ces cylindres portent à l'une de leurs extrémités un galet en métal *c*, fixe sur l'axe du cylindre, et reposant sur une tringle *e*.

Des tirans *G*, fixés aux barres *F*, à charnière en *f*, sont attachés, par des leviers angulaires *g* à articulation, à l'axe en fer *H* qui traverse librement l'arbre du moulin.

Lorsque les barres mobiles *F* sont lancées à la circonférence par une rotation trop vive, elles font en glissant tourner les galets *c*, qui à leur tour font faire la rotation aux cylindres *E*; les morceaux de toile s'enroulant alors sur ces cylindres, les ailes se déshabillent.

Mais, par ce mouvement des barres *F*, l'axe de fer *H* recule vers le centre du moulin ; la crémaillère qu'il porte en *I* fait tourner dès lors l'engrenage *K* et la poulie *M*, sur laquelle s'enroule une corde où est attaché un contre-poids qui s'élève en même temps.

Lorsque le vent fléchit, le contre-poids n'étant plus soutenu par la force centrifuge des barres *F*, descend et repousse l'axe *H*, et ramène ainsi les barres à leur première position ; et ces barres en revenant font détourner les petits cylindres *E* et dérouler leurs voiles respectives, pour les ramener au point où elles étaient avant le changement de vitesse.

On conçoit que ces voiles se déroulent et s'enroulent plus ou moins, suivant que le mouvement rectiligne des barres *F* est plus ou moins étendu.

Fig. 4. Détails d'un cylindre ; les mêmes lettres sont affectées aux mêmes objets.

Fig. 5. Détail des barres dont les ailes se composent.

Fig. 6. Détail de la tête du moulin et des leviers à articulation *g*.

PLANCHE XIII.

Moulin à vent à mouvement de rotation horizontal.

Fig. 1 et 2. *A*, élévation d'une portion du bâti.

A', arbre vertical qui porte les bras horizontaux *B*.

C, collet de métal dans lequel l'arbre vertical tourne.

D, cônes en toiles disposés horizontalement et perpendiculairement sur les bras du moulin.

H, tringles de bois pour lier les cônes entre eux.

Autre moulin à vent à rotation horizontale.

Fig. 3. Élévation de la portion supérieure d'un moulin de cette espèce.

a, portion du bâti et de l'arbre vertical du moulin.

b, plate-forme sur laquelle les quatre châssis triangulaires *c* tournent.

d, galets pour rendre le mouvement plus doux.

p, petits treuils pour manœuvrer les voiles latines *e*; on voit le plan de ce système de treuil en *p*, fig. 4.

Chaque voile est fixée par une des extrémités de sa base au point *n* du châssis triangulaire, et par l'autre extrémité *m* à la corde *i* qui s'enroule sur l'un des treuils correspondans; en tournant le treuil dans un sens, la voile se développe par sa base, et en tournant dans le sens contraire, la voile se replie sur elle-même, et reste néanmoins attachée par son sommet *o* au châssis voisin.

Fig. 4. Plan de la portion supérieure de ce moulin.

PLANCHE XIV.

Chaudières à vapeur.

Fig. 1 Chaudière à vapeur, en tôle de fer; élévation de cette chaudière et coupe du fourneau.

a, corps de la chaudière.

b, trou par où s'introduit un homme dans la chaudière pour y faire les réparations nécessaires.

c, tuyau à vapeur.

d, soupape de sûreté.

e, tuyau d'alimentation.

f, grille du fourneau.

g, conduit de chaleur circulant autour de la chaudière.

h, cendrier.

i, grille du cendrier.

Fig. 2. Plan du fourneau, la chaudière enlevée.

m, ouverture de la cheminée.

Fig. 3. Coupe transversale du fourneau, et vue par le bout de la chaudière.

Fig. 4. Coupe sur la longueur, d'une chaudière en fonte avec deux bouilleurs et de son fourneau.

A, chaudière composée de deux pièces *A* et *A'* réunies au point *B*.

C, trou pour passer l'homme.

D, emplacement du tuyau d'alimentation.

E, tubulure sur laquelle s'adapte le tuyau à vapeur.

F, place de la soupape de sûreté.

G, cylindre de fonte nommé bouilleur, communiquant avec la chaudière par les tubulures *a*.

Fig. 5. Coupe transversale de la chaudière et fourneau précédent.

H, grille du cendrier.

Fig. 6. Élévation d'une chaudière en fonte analogue à la précédente, et coupe du fourneau.

Elle est composée de trois pièces *a a' a''* réunis au point *b b'*, et de six bouilleurs *c*, on voit le trou d'homme en *d*. Les quatre tubulures *k*, *l*, *m* et *n*, ont les mêmes destinations que celles *E*, *D*, fig. 4.

Fig. 7. Plan du fourneau.

h, grille du foyer.

i, tubulures de communication des bouilleurs avec la chaudière.

PLANCHE XV.

Appareil alimentaire d'une chaudière à basse pression.

Fig. 1. *A*, chaudière.

B, tuyau en fer portant à sa partie supérieure un petit réservoir *B'*, et plongeant dans l'eau de la chaudière par sa partie inférieure.

Le petit réservoir *B'* communique avec le tuyau par une ouverture fermée par un tampon *C* (*voy.* fig. 2); la tige de ce tampon est attachée au levier *G*, auquel est suspendu le flotteur *E*. Il est clair que lorsque le niveau de l'eau de la chaudière baisse, le flotteur *E* descend en traînant avec lui l'extrémité du levier qui soulève alors le tampon, et permet à l'eau du petit réservoir *B'* de descendre dans le tuyau *B*, et de ramener le niveau de l'eau à son point primitif. Un flotteur suspendu à une chaîne passe par le milieu du réservoir; cette chaîne va, par l'intermédiaire des poulies *F*, s'attacher au registre du fourneau.

Lorsque la vapeur augmentant de tension soulève l'eau et le flotteur du tuyau *B*, le registre se ferme plus ou moins.

Fig. 2. Détails du petit réservoir *B'*.

G, levier à fourchette.

H, contre-poids.

C, tampon.

Fig. 3. Plan de la figure précédente.

Fig. 4. Petit flotteur avec index, qu'on place à la paroi latérale de la chaudière pour y connaître le niveau de l'eau.

Pompe alimentaire.

Fig. 5. Coupe verticale du corps de pompe.

A, corps de pompe.

B, piston.

C, soupape qui se lève pour laisser passer l'eau au-dessus du piston lorsqu'il descend.

D, tige du piston.

E, *F*, soupape et tuyau d'aspiration.

G, tuyau de décharge.

Fig. 6. Coupe horizontale du corps de pompe, suivant la ligne $x\,x$, fig. 5.

Pompe alimentaire de machines à haute pression.

Fig. 7. Coupe verticale.

a, corps de pompe.

b, tige cylindrique faisant les fonctions de piston solide.

c, tuyau horizontal servant pour l'eau aspirée par la soupape *d*, et pour l'eau refoulée par la soupape *e*.

f, étrier avec vis de pression, pour fermer et ouvrir la chapelle des soupapes, suivant le besoin.

g, tuyau communiquant avec la chaudière à vapeur et portant un robinet *h*, pour régler la quantité d'eau qu'on veut admettre dans la chaudière.

Le jeu de cette pompe est simple; lorsqu'on tire la tige *b*, le vide se fait dans le corps de pompe *a*, et la soupape *d* se soulève pour laisser passer l'eau d'aspiration, et la soupape *e* se ferme; lorsque la tige *b* descend, l'eau des corps de pompe est refoulée dans le tuyau *c*, et la soupape *d* se ferme à son tour, tandis que la soupape *e* se soulève pour laisser passer l'eau dans le tuyau de communication *g*.

e, *e'*, *d*, *d'*, élévation et plan des soupapes vues isolément.

Soupape de sûreté.

Fig. 8. Élévation et coupe.

b, cylindre creux dans lequel la soupape conique *a* est renfermée avec sa tige *c*.

d, contre-poids qu'on proportionne à l'aire de la soupape et à la tension de la vapeur.

e, tubulure en communication avec la vapeur.

f, tubulure communiquant avec l'air extérieur, et par laquelle la vapeur s'échappe lorsque la soupape est soulevée.

Soupape de sûreté de M. Maudslay.

Fig. 9. Élévation et coupe.

a, cylindre renfermant la soupape conique *b*.

c, tige de cette soupape glissant dans la boite à étoupe *d*.

g, contre-poids appuyant sur la soupape *b*.

e, surface appliquée sur la chaudière à vapeur.

f, tubulure pour donner issue à la vapeur lorsque la soupape est soulevée.

Soupapes de sûreté à piston.

Fig. 10. Coupe verticale.

A, petit piston entrant exactement dans le cylindre *B*.

C, tige du piston enfilée dans un double ressort à boudin *D*, qui maintient le piston au fond de son corps de pompe.

E, ouvertures pratiqués au-dessus de la partie inférieure du corps de pompe par où s'échappe la vapeur, lorsqu'elle est assez forte pour élever le piston au-dessus de ces ouvertures.

F, tuyau par lequel sort la vapeur après avoir passé par les ouvertures *E*.

Soupape de sûreté de M. Edwards.

Fig. 11. Élévation et coupe suivant *yy*, fig. 12.
Fig. 12. Plan et coupe suivant *zz*, fig. 11.
Fig. 13. Coupe verticale suivant *vv*, fig. 12.

a, deux soupapes de sûreté. Le clapet dont la partie fermante est plate et s'applique sur l'extrémité du tuyau dans lequel entre ce clapet, celle qui entre dans le tuyau et qui est percée de trois larges ouvertures pour donner passage à la vapeur, sert à diriger la course du clapet, ce qui remplace la tige dont cette espèce de soupape est ordinairement garnie au centre.

b, levier pressant sur les soupapes par l'effet des poids *h* placés à leur extrémité.

c, deux tubulures ou conduits qui mènent la vapeur aux clapets.

d, balancier terminé par deux arcs de cercle; le segment *e* porte une chaîne du genre de la chaîne de montre, à l'extrémité de laquelle s'accroche la tige *f* du flotteur, qui glisse dans une boîte à étoupe grasse *f'*.

g, poids servant d'équilibre au flotteur suspendu à la tige *f*.

PLANCHE XVI.

Pistons moteurs.

Fig. 1 à 5. Piston à garniture de chanvre.

Ce piston est composé de trois parties principales, savoir : 1°. du corps du piston *a*; il est en fonte : on en voit l'élévation fig. 1, et la coupe fig. 5; 2°. du couvercle *b*, également en fonte : la fig. 2 en présente l'élévation, et la fig. 4 la coupe; 3°. de chanvre tressé et graissé comme on le voit en *c*, fig. 1.

Le couvercle *b* est destiné à presser la garniture sur elle-même et à la faire renfler, lorsque le piston a pris trop de jeu dans le travail. On produit cet effet au moyen de quatre boulons *d*, fig. 3 et 5.

Comme il importe que ces boulons ne se détournent pas, on les maintient par une rondelle *e*, fig. 3, maintenue elle-même par deux arrêts *ff*, même fig.

On remarque en *k*, figure 5, des dés d'acier en queue d'aronde, logés dans la fonte du corps du piston, et taraudés pour recevoir les boulons, ce qui est plus solide que de tarauder la fonte.

Fig. 5. *h*, embase de la tige *g* du piston.

i, écrou pour la fixer.

Fig. 1. Élévation du piston.

Fig. 2. Élévation du couvercle.

Fig. 3. Plan du piston.

Fig. 4. Coupe du couvercle suivant la ligne *xx*.

Fig. 5. Coupe du piston avec son couvercle suivant la ligne *yy*.

Piston à garniture avec engrenage.

Fig. 6 à 10. Ce piston est composé des mêmes parties que le précédent; il diffère de celui-ci en ce qu'il porte un engrenage qui per-

met de serrer la garniture sans avoir besoin d'ôter le couvercle du cylindre à vapeur, attendu que l'axe *o* du pignon vient se présenter à une ouverture pratiquée sur le couvercle du cylindre.

Fig. 6. Élévation du piston.

Fig. 7. Élévation de l'engrenage et du pignon.

Fig. 8. Plan du piston.

Fig. 9. Élévation du couvercle.

Fig. 10. Coupe du piston suivant la ligne *zz*, fig. 8.

a, corps du piston.

b, couvercle.

m, engrenage.

n, goujon pour empêcher le couvercle de tourner lorsqu'on fait agir l'engrenage.

g, tige du piston.

p, clavette pour fixer la tige *g*.

q, rondelle taraudée fixée sur la roue d'engrenage, et se vissant avec l'engrenage sur la tige du piston, comme on le voit sur cette figure.

Piston métallique.

Fig. 11 à 14. La garniture de ce piston se compose de deux doubles rangées de segmens de cuivre, l'une extérieure et l'autre intérieure. Ces segmens sont superposés de manière que le supérieur recouvre la ligne de contact de deux segmens consécutifs, pour fermer toute issue à la vapeur; des ressorts à boudin, enfilés sur des goujons, tendent constamment à appliquer les segmens contre les parois du corps de pompe, et à remédier ainsi aux petites inégalités que peut présenter le calibre de ce corps de pompe.

Fig. 11. Élévation du piston; on y voit la manière dont les segmens sont superposés.

Fig. 12. Plan du piston.

a, rangée extérieure de segmens.

b, rangée intérieure.

c, ressorts à boudin, montés sur leurs goujons.

d, goujons dégarnis de leurs ressorts.

c' ressort et d' goujons, vus isolément.
Fig. 13. Élévation d'un segment.
Fig. 14. Coupe du piston.
e, couvercle.
f, corps du piston.
a, segmens extérieurs.
b, segmens intérieurs.
c, ressort à boudin.
g, rainure dans laquelle les segmens extérieurs peuvent glisser, sans dévier.
h, tige du piston.
i, clavette pour la fixer.

Autre piston métallique.

Fig. 15 à 18. Il ne diffère essentiellement du précédent que par la forme des ressorts.
Fig. 15. Élévation du piston.
Fig. 16. Plan du piston.
a, rangée extérieure des segmens.
b, rangée intérieure.
c, ressorts appuyés sur le cercle *d*.
d, dispositions des segmens.
Fig. 17. Coupe du corps du piston qui est en fonte.
Fig. 18. Coupe du piston tout monté.

d, couvercle du piston, fixé à vis sur le corps; on voit en *e* les deux doubles rangées de segmens, en *f* la tige; en *h* une pièce de fonte creuse rapportée sous le corps du piston, pour remplir le vide qu'il laisse, sans le rendre trop lourd.

PLANCHE XVII.

Divers moyens mécaniques de faire ouvrir et fermer les soupapes et robinets, dans les machines à vapeur.

Fig. 1. Vue en élévation, de face et de côté, de l'excentrique monté sur l'axe du volant dans les machines à vapeur du système de Watt. C'est une espèce de poulie en fonte de fer sur la circonférence de laquelle est pratiquée une gorge carrée. Sa fonction est de transformer le mouvement de rotation continu en celui de va-et-vient dont l'étendue égale la différence des rayons de l'excentrique.

A, axe du volant sur lequel se fixe l'excentrique à l'aide d'une vis de pression *a*.

B, bielle en fer forgé qui, d'un côté, porte un collier formé de deux parties en cuivre qui embrassent, sans la serrer, la gorge de l'excentrique, et de l'autre, un manche *b* et une entaille dans laquelle entre un axe *c*, faisant partie du levier angulaire et à fourchette *C*. Ce levier tournant autour du point fixe *d* et ayant sa branche verticale *e* alternativement poussée et tirée dans le sens horizontal par l'effet de l'excentrique, sa branche horizontale *f* va faire mouvoir de la même manière la tige verticale *D*, à l'aide des petites bielles *g*.

E, boîte en cuivre qui sert de guide à la tige verticale *D*.

F, contre-poids suspendu au prolongement de la branche horizontale *f* du levier angulaire *c*, qui équilibre tout cet équipage. On voit qu'au moyen de l'entaille qui se met à cheval sur l'axe *c*, on est maître de produire ou de suspendre à volonté l'effet du mouvement de va-et-vient de la bielle *B*, ce qui est nécessaire quand on veut purger d'air l'intérieur de la machine à vapeur.

m, goujon faisant partie du levier angulaire *c*; il est destiné à recevoir une clef à douille, au moyen de laquelle on manœuvre le tiroir, sans le secours de la bielle *B*. Ce tiroir est semblable à celui qui est représenté planc. 22, fig. 2.

Fig. 2 et 3. Vue en élévation, de face et de côté, d'un moyen employé

pour faire mouvoir les soupapes enfilées des machines à haute et à double pression du système de Woolf.

Une roue d'engrenage d'angle *A*, reçoit un mouvement de rotation continu de la machine. L'axe de cette roue porte en *B* et *C* deux excentriques dirigés en sens contraire et qui poussent alternativement en haut et en bas, les tiges *E* et *F*. La tige *F*, au moyen des bras ou leviers *c'* et *d'* fait ouvrir, et fermer alternativement les soupapes *c* et *d*, tandis que la tige *E* manœuvre de la même manière les soupapes *a* et *b*.

e, emplacement de la soupape d'admission de la vapeur.

f, tuyau qui conduit la vapeur dans la boîte des soupapes, *b*, *d*.

g, conduit qui mène la vapeur au condenseur.

Fig. 4 et 5. Élévation et plan d'une came *A*, faisant jouer un levier angulaire *B* autour du point *D*. Il en résulte que le triangle *C*, fixé à charnière à l'extrémité de la branche verticale du levier angulaire *E*, reçoit un mouvement alternatif dans le sens horizontal.

Fig. 6 et 7. Mouvement de rotation alternatif d'un robinet distributeur *E*, produit par deux leviers *F*, *G* que porte dans deux plans différens l'axe horizontal *H*, tournant toujours dans le même sens.

La tête du robinet est munie, sur un des côtés de la circonférence, d'une dent *a* placée dans le plan du levier F; et cette même tête porte à l'opposé de la dent *a* du goujon *b*, dans le plan du levier G. L'axe H, venant à tourner dans le sens de la flèche, les leviers F et G poussent alternativement la dent *a* et le goujon *b*, dans le même sens, mais le résultat est de faire aller et venir sur lui-même le robinet E, à cause de la position inférieure et supérieure au centre de la dent et du goujon.

Fig. 8 et 9. Coupe verticale et vue de face ou élévation d'un excentrique A tournant autour du point *a*, dans une lunette B.

La forme de cet excentrique, dont on voit la coupe fig. 9, est limitée par trois arcs de cercle *b c d*, décrits réciproquement de chacun des angles qui leur sont opposés. C'est un triangle équilatéral curviligne. L'axe qui le porte venant à tourner dans un sens quelconque, le côté opposé à l'angle *a* pousse alternativement la lunette B dans la

direction de ses tiges C. L'étendue du mouvement est égal à la hauteur du triangle.

La lunette B est garnie aux endroits du frottement, de deux plaques d'acier trempé *e e*, pour éviter une trop prompte destruction de la matière.

Fig. 10. Vue de face de l'encliquetage dont les anciennes machines à vapeur étaient et sont même encore pourvues, pour faire jouer les robinets et soupapes.

Des tasseaux A et B fixés à coulisse de part et d'autre sur une barre de fer C qui se meut verticalement, viennent alernativement appuyer sur les leviers D, E, qu'ils font monter et descendre dans les limites indiquées par les lignes ponctuées *a*, *b*. Ces leviers, au moyen de tringles, font ouvrir et fermer alternativement les soupapes pour la distribution de la vapeur.

PLANCHE XVIII.

Divers moyens mécaniques de distribuer la vapeur dans les machines.

Fig. 1re. Coupe verticale d'une boîte à vapeur, où les conduits *a* et *b* sont ouverts et fermés par une soupape A à tiroir dont le mouvement alternatif dans un plan vertical est produit par une crémaillère et une portion de roue dentée.

La position actuelle de cette soupape met en communication la boîte à vapeur avec le haut du cylindre, tandis que le conduit *b* met en communication le bas du cylindre avec le conducteur; l'effet inverse a lieu quand la soupape occupe la position supérieure.

c, conduit qui mène la vapeur au condenseur.

Fig. 2. Coupe verticale d'une boîte à vapeur et d'une soupape horizontale A, fixée sur le haut d'un axe vertical B, ayant un mouvement de rotation continu sur lui-même.

Fig. 3. Coupe horizontale de la même soupape suivant la ligne X X, fig. 2.

Fig. 4. Vue de la face inférieure de la soupape.

Fig. 5. Plan du fond de la boîte à vapeur sur lequel tourne la soupape, et où sont pratiquées les ouvertures circulaires *a*, *b*, *c*, qui communiquent avec le haut, le bas du cylindre et avec le condenseur.

A travers la soupape A est percé un trou carré *d* correspondant aux ouvertures *a*, *b*, qui met alternativement en communication la boîte à vapeur avec le haut ou le bas du cylindre, pendant tout le temps que ce trou reste à parcourir l'une des ouvertures *a*, *b*; la cavité *c*, pratiquée sous une portion de la soupape, permet à la vapeur contenue dans le côté du cylindre vers lequel le piston s'avance, de se rendre au condenseur. Dans la position actuelle, on voit que c'est l'ouverture *b* qui correspond au trou *d*, et qu'alors l'ouverture *a* correspond à la cavité *e*, qui communique avec l'ouverture *c*.

Oliver Evans a fait usage de cette soupape dans ses machines à haute pression.

Fig. 6 et 7. Coupes verticales des deux boîtes à vapeur d'une machine garnies de soupapes coniques qui jouent par le moyen de crémaillères, et d'arcs de cercle dentés.

Fig. 8 et 9. Coupes des mêmes boîtes par un plan vertical et perpendiculaire à la première coupe. Le mouvement est donné à l'arc de cercle denté, et par conséquent aux soupapes, par le levier *A*, fig. 8, qui reçoit lui-même un mouvement alternatif de rotation autour de l'axe horizontal *a* par l'effet de la machine. On voit que la fermeture exacte de la soupape a lieu quand ce levier se trouve dans la direction de la bielle *b*, et l'ouverture quand l'un et l'autre prennent la position ponctuée *d*.

Fig. 10. Vue de la soupape conique supérieure, avec sa crémaillère, dessinée sur une échelle double.

Fig. 11 et 12. Coupes verticales dans deux sens différens de la boîte à vapeur, etc.

Les deux soupapes *A B* sont formées de demi-cylindres en cuivre, unis entre eux dans une même direction verticale, par une tringle de fer *C* qui joue librement dans un canal ménagé à cet effet.

Dans ces machines, construites d'ailleurs d'après le système de Watt, la vapeur, arrivant de la chaudière dans l'espace que laissent entre eux le cylindre et son enveloppe, se rend ensuite par l'ouverture *a*, garnie d'une soupape que le régulateur gouverne, dans la colonne *D*, qui sert de boîte à vapeur; de là elle passe tantôt au-dessous du piston, comme dans le cas actuel, et tantôt au-dessus, suivant la position des demi-cylindres soupapes *A*, *B*.

E, colonne qui conduit au condenseur.

Le mouvement alternatif vertical est donné à ces soupapes par un excentrique qui porte l'axe du volant de la machine.

Fig. 13 et 14. Profil et plan d'une de ces soupapes.

Fig. 15. Coupe de la boîte supérieure, vue isolément.

Fig. 16. Coupe de la boîte supérieure.

Ces deux dernières figures montrent l'instant où la vapeur arrive sur la tête du piston, et que la communication est établie entre la condensation et la partie inférieure du piston.

PLANCHE XIX.

Condenseurs et pompes à air.

Fig. 1re. Coupe verticale d'un condenseur et d'une pompe à air séparés.

A, condenseur.

B, ouverture par laquelle entre la vapeur après son action.

C, ouverture par laquelle on fait arriver l'eau froide, lorsqu'on lève le petit tiroir *D*; on règle la quantité d'eau qu'on veut faire arriver dans le condenseur, en levant plus ou moins le petit tiroir.

E, clapet qui empêche le retour de l'eau aspirée par la pompe à air dans le condenseur.

F, corps de pompe.

G, piston à garniture de chanvre.

H, clapets qui s'ouvrent lorsque le piston descend, pour laisser passer l'eau et l'air qui se trouvent à la partie inférieure du corps de pompe; le clapet *E* se referme alors pour ne rien laisser pénétrer dans le condenseur.

On voit par la coupe verticale fig. 2, et par le plan fig. 3, les détails du piston *G* et des clapets *H*, plus en grand, et les arrêts *L*, contre lesquels ils viennent butter pour ne point sortir d'une position convenable.

Quand le piston remonte, les clapets *L* se referment, et l'eau et l'air sortent, par le tuyau de dégorgement, armé lui-même d'un autre clapet *K* qui s'ouvre quand le piston remonte.

M, boîte à étoupes pour laisser passer la tige *N* du piston.

Fig. 4. Coupe verticale du condenseur et d'une pompe à air dans une même bâche.

Le condenseur est ici compris dans l'espace annulaire *a*; c'est un cylindre qui enveloppe le corps de pompe à air.

b, tuyau qui amène la vapeur à condenser.

c, robinet d'introduction de l'eau froide; on règle l'ouverture de

ce robinet d'après le mouvement de l'aiguille *d* sur un arc de cercle divisé.

e, corps de pompe.

f, piston à garniture de chanvre.

g, disque de métal qui glisse à frottement doux sur la ligne du piston, jusqu'au collet *h*, lorsque le piston descend pour permettre à l'eau de s'élever au-dessus du piston.

i, disque de métal faisant les fonctions de soupape comme le disque *g*.

k, bride pour retenir ce disque dans une position convenable.

l, bâche enveloppant le condenseur et sa pompe; elle est constamment alimentée d'eau froide.

m, petite bâche qui reçoit l'eau de condensation et les substances aériformes qui viennent du condenseur.

r, clapet qui se soulève pour la recevoir.

n, boîte à étoupe pour la tige *o*.

Fig. 5. Coupe verticale d'un condenseur avec pompe à air, réunis.

Il ne diffère essentiellement du précédent qu'en ce qu'il n'est pas renfermé dans une grande bâche d'eau froide.

A, capacité annulaire du condenseur.

B, orifice par lequel la vapeur arrive à la condensation.

C, robinet d'injection de l'eau froide.

D, corps de pompe.

E, piston.

F, disque glissant sur la tige du piston qu'on voit soulevé, parce que le piston descend.

G, petite bâche pour recevoir l'eau de condensation.

Fig. 6. Coupe du piston.

Fig. 7. Plan du piston; on voit en *H* les ouvertures par lesquelles l'eau de condensation s'élève au-dessus du piston.

Fig. 8. Condenseur et pompe à air séparés, placée dans la même bâche.

a, condenseur.

b, tuyau qui amène la vapeur à la condensation.

c, robinet d'injection.

d, petit tuyau par lequel l'air s'échappe du condenseur.

e, clapet du condenseur.

f, corps de pompe.

g, piston garni.

h, disque qui se soulève pour laisser passer l'eau au-dessus du piston quand il descend.

i, tuyau de dégorgement.

k, grande bâche à eau froide dans laquelle le condenseur et la pompe sont plongés.

l, petite bâche pour recevoir la vapeur condensée.

Fig. 9. Coupe verticale d'une pompe aspirante à eau froide.

a, corps de pompe.

b, piston.

c, soupape qui s'ouvre pour laisser passer l'eau quand le piston descend.

d, clapet.

e, tuyau d'aspiration.

f, tuyau de dégorgement.

g, coupe du corps de piston.

h, plan du piston.

PLANCHE XX.

Machine à vapeur, dite de Newcomen.

C'est la première combinaison mécanique où l'on ait pu faire servir la force expansive de la vapeur à soulever un piston dans un corps de pompe, et ensuite le poids de l'atmosphère, pour le faire redescendre en faisant le vide au-dessous, par la condensation de la vapeur au moyen d'une injection d'eau froide. Cette machine remplaça, pour l'épuisement des eaux dans les mines, la machine sans piston du capitaine Savery.

Fig. 1. Coupe verticale de la machine et de son fourneau, par un plan passant par le centre de la chaudière et du cylindre, parallèlement au plan du balancier.

A, chaudière en cuivre rouge.

a, tuyau indiquant en dehors le niveau de l'eau dans la chaudière.

a', autre tuyau qui fait également connaître en dehors si l'eau n'est pas à la hauteur convenable dans la chaudière.

b, tuyau alimentaire de la chaudière, où se trouve en même temps la soupape de sûreté.

B, Ouverture par laquelle la vapeur passe de la chaudière dans le cylindre.

C, cylindre de la machine.

D, piston de la machine, supposé dans le plus haut de sa course.

E, tuyau d'injection d'eau froide pour la condensation.

e, robinet d'injection que le jeu de la machine fait ouvrir et fermer en temps opportun.

F, réservoir d'eau froide qui fournit l'eau d'injection : il est placé dans le haut du bâti de la machine, afin de rendre l'injection forte et prompte.

G, balancier en bois, portant à ses deux bouts des arcs de cercle décrits du centre de l'axe *f*, autour duquel il oscille.

h, tige du piston de la pompe d'injection, que le balancier *G* fait mouvoir.

I, tige de la pompe du puits de la mine, dont le haut est formé d'une tige à articulation qui s'applique constamment contre l'arc de cercle du balancier.

K, tige du piston *D*, terminée par une chaîne semblable à la précédente, et qui s'applique comme elle sur l'autre arc de cercle; on voit que cette disposition a pour objet de faire mouvoir l'une et l'autre tige suivant une ligne verticale.

L, plancher servant de point d'appui à l'axe du balancier.

M, poutrelle verticale que le balancier fait mouvoir, et qui fait à son tour manœuvrer, par le moyen des encliquetages *y*, *z*, le robinet d'injection *e*, et la soupape d'admission de la vapeur *Q*.

N, grille du fourneau immédiatement au-dessous du fond de la chaudière.

O, canal par où s'écoule l'eau produite par les injections et la vapeur condensée. C'est une partie de cette même eau très-chaude qu'on admet dans la chaudière pour l'alimenter.

P, tuyau à robinet qui prend de l'eau dans le tuyau *E*, et qui la verse au-dessus du piston *D*, pour le faire fermer hermétiquement.

R, plancher fait de côté et d'autre de la machine.

S, tuyau garni d'un robinet, par lequel on fait évacuer l'eau accumulée dans le bas du cylindre, quand la machine est arrivée à l'état de repos.

pp, pièces de charpente faisant partie du bâti.

q, tringle qui fait manœuvrer la soupape d'admission de la vapeur: elle est unie à charnière au levier angulaire *z*, tournant sur un axe horizontal.

r, ressort en bois destiné à amortir le coup du balancier.

Fig. 2. Coupe verticale du bas du cylindre sur des dimensions doubles, et vue en élévation de l'encliquetage.

Fig. 3. Plan horizontal de cette même disposition : les équipages suspendus de part et d'autre du centre d'oscillation du balancier, doivent être à peu près en équilibre. Alors, la vapeur venant à s'introduire dans le bas du cylindre au-dessous du piston, soulève celui-ci avec toute sa force expansive, et le fait monter au point le plus élevé de sa course. Les tiges des pompes *H* et *I* s'abaissent dans

ce moment, la soupape *Q* se ferme, le robinet d'injection *e* s'ouvre, et fait condenser la portion de vapeur qui se trouve dans le cylindre. Le poids de l'atmosphère agissant sur le piston le fait descendre à son point de départ, ainsi de suite, en faisant descendre et monter alternativement les tiges des pompes *H* et *I* qui lui sont opposées.

PLANCHES XXI et XXII.

Machine à vapeur de Watt.

Fig. 1. Élévation et coupe de cette machine.

La vapeur est reçue immédiatement de la chaudière dans l'espace annulaire laissé entre les deux cylindres concentriques *A* et *B*.

La machine est représentée dans le moment où la vapeur passe de cet espace annulaire au-dessus du piston *C*, par le conduit *D* que vient d'ouvrir le tiroir *F*. On voit en *E* un autre conduit d'admission renfermant une petite soupage à gorge, pour régler les quantités de vapeur à admettre dans le cylindre.

Pendant que le piston descend, la vapeur qui est au-dessous s'échappe par le conduit *G*, et arrive dans le condenseur *I* par un second conduit *H*. Le condenseur *I* est en communication avec la pompe à air *K*.

Quand le piston est arrivé au bas de sa course, le tiroir *F* s'abaisse; le conduit *G* se ferme pour le condenseur, et s'ouvre pour recevoir la vapeur qui enveloppe le tiroir; tandis que le conduit *D* se ferme pour l'admission de la vapeur et s'ouvre pour le condenseur, ce qui détermine l'ascension du piston et le départ de la vapeur qui est au-dessus, pour passer à son tour dans le condenseur : ce passage a constamment lieu par l'intérieur du tiroir, lorsque le piston monte.

On verra mieux les détails du tiroir dans la planche suivante. Son mouvement rectiligne de va-et-vient produit par l'excentrique *S*, que l'on voit à l'axe du volant *R* de la machine. La pièce *T* transmet le mouvement de l'excentrique au levier coudé *U*, et celui-ci au tiroir. (*Voy*. Pl. 22, pour les détails.)

L, petit mécanisme pour régler l'arrivée de l'eau de condensation.

M, pompe alimentaire.

N, pompe à eau froide.

O, parallélogramme destiné à conserver à la tige sa verticalité.

V, modérateur qui doit être en communication avec l'axe volant et

la soupape à gorge, pour régler l'admission de la vapeur dans le tiroir.

P, bielle communiquant le mouvement à la manivelle *Q*.

Fig. 2. Coupe du tiroir dans les deux positions pour faire arriver la vapeur dessus ou dessous le piston ; on voit la coupe transversale du tiroir en *F*, fig. 4.

Fig. 3. Élévation de la partie inférieure de la machine suivant la ligne *xx*, fig. 4.

Fig. 4. Plan de la machine.

PLANCHE XXIII.

Machine à vapeur de Maudslay.

Fig. 1. Élévation de la machine.

a, corps de pompe.

b, ligne du piston moteur surmontée de deux galets; on en voit un en *c*.

d, une des deux bielles qui mettent en communication le sommet de la tige avec la manivelle *e* du volant *f*, qu'on voit ponctué sur cette figure.

h, bâti en fonte de la machine.

i, pompe alimentaire.

k, bâche renfermant la pompe à eau froide.

l, bâche renfermant le condenseur et la pompe à air.

m, robinet à vapeur.

Fig. 2. Vue de cette machine, prise du côté du robinet et du condenseur.

o, pièce de fer fixée sur la tige du piston, portant les deux galets *c* et les deux bielles *d*.

Fig. 3. Coupe verticale passant par le centre de la machine; on y suppose que la vapeur admise sous le piston le fait monter; pour concevoir le jeu de tout le système, il faut remarquer d'abord que le noyau du robinet *m* porte une poche *I*, fig. 1re. pl. 24, qui, recevant la vapeur immédiatement du tube de communication avec la chaudière, se porte tantôt sur le conduit *o* pour faire agir la vapeur sous le piston, et tantôt sur le conduit *p*, pour le faire agir dessus. Ici on voit la poche en communication avec le conduit à vapeur *o* et en même temps la communication ouverte, à la vapeur qui est dessus le piston avec le condenseur *q*, par l'intermédiaire du conduit *p* et du conduit *r*, qui débouche dans le condenseur par un autre conduit vertical *r'*, fig. 2 et 3 : la figure détachée *x* montre la poche en communication avec le conduit *p* qui dirige

la vapeur sur le piston et le conduit *o* en communication avec le conduit *r* qui mène à la condensation, ce qui représente le second temps du robinet.

La fig. *y* montre, par la position de la poche, que toute communication est fermée entre l'intérieur du cylindre et la chaudière à vapeur.

Les détails du robinet qu'on voit sur la planche suivante, achèveront d'en faire connaître la construction; revenons à notre figure.

Le piston, en s'élevant, entraîne les bielles *d* avec lui, ainsi que la manivelle *e* du volant, et fait basculer le petit balancier *s* sur la pièce de jonction *s'*; ce balancier est destiné à faire manœuvrer la tige *t* de la pompe à air *t'*, la petite pompe alimentaire *i'* et la pompe à eau froide *v*; la fig. 3 montre la position de ces diverses pièces, lorsque le piston monte.

Quant à la manœuvre du robinet, elle s'opère par l'excentrique *z* fixé sur l'axe de la manivelle; cet excentrique, par sa rotation fait aller et venir le petit châssis *z'* lié au robinet par les pièces de jonction *z''* et celle qu'on voit ponctuée sur la fig. 3; dans ce mouvement de l'excentrique, le robinet prend les diverses positions qu'il doit prendre pour admettre la vapeur dessus et dessous le piston.

Le petit levier *a'* sert à manœuvrer le robinet à la main, lorsqu'on veut, par exemple, purger d'air la machine.

La fig. 4 est une coupe horizontale d'un fragment du cylindre pris du côté des conduits à vapeur et suivant la ligne *x' x'*.

Fig. 5. Plan de la manivelle; *b'* points d'attache des bielles, *z* excentrique; *e'* point d'attache de la pièce de jonction *s'* du petit balancier *s*.

PLANCHE XXIV.

Détails du robinet de Maudslay et du modérateur.

Fig. 1re. Coupe verticale ou perpendiculaire à l'axe du robinet, et d'une partie des conduits, suivant la ligne $x\ x$, fig. 2.

I, poche du noyau du robinet.

N, ouvertures pratiquées à ce noyau pour mettre l'intérieur de celui-ci en communication avec les divers conduits.

P, conduit de vapeur au-dessus du piston.

O, conduit de vapeur au-dessous.

R, conduit de vapeur à la condensation.

M, ouverture pratiquée dans le boisseau du robinet, et communiquant immédiatement avec le tube à vapeur *M'*.

Fig. 2. Coupe horizontale du robinet suivant la ligne $y\ y$, fig. 1re.

Q, ressort à boudin, enfilé sur une broche prolongeant l'axe du robinet, et servant à maintenir le noyau conique dans le boisseau.

Fig. 3. Vue extérieure de la fig. 1re.

Fig. 4. Robinet vu isolément avec le levier *K* qui le manœuvre.

A, couvercle du robinet.

A', élévation de ce couvercle.

A'', vue de la petite base du noyau conique, prise du côté du levier.

Fig. 5. Élévation du modérateur et de la soupape d'admission.

A, boules s'écartant du centre de rotation, lorsque la vitesse de l'axe vertical *B* est trop vive : en s'écartant elles ramènent le canon *D* enfilé sur l'axe *B* vers le point *E*, et en se rapprochant, elles le ramènent vers le point *E'*; le levier *F*, attaché au canon *D*, en suit tous les mouvemens qu'il transmet comme on le voit au levier d'une soupape à gorge renfermée dans le tube à vapeur.

La position de cette soupape à gorge est telle que lorsque les boules s'écartent, elle resserre le passage de la vapeur; et lorsqu'elles se rapprochent, la soupape s'ouvre davantage.

I, support du modérateur.

L, poulie à plusieurs gorges sur laquelle s'enroule une corde qui prend son mouvement sur l'axe *M* du volant.

Fig. 6. Coupe de la soupape à gorge, et d'une portion du conduit à vapeur.

Fig. 7. Coupe perpendiculaire à l'axe du conduit à vapeur, au point où est placée la soupape à gorge.

G', petit levier isolé de la tige de la soupape.

PLANCHE XXV.

Machine à haute pression pour un bateau à vapeur.

Fig. 1. Élévation de la machine vue du côté du cylindre à vapeur.
Fig. 2. Coupe verticale du cylindre à vapeur, où l'on voit le piston, le robinet et les deux conduits qui mènent alternativement la vapeur dessus et dessous le piston.
Fig. 3. Élévation de la machine suivant la longueur de la chaudière.
Fig. 4. Coupe verticale de la chaudière, suivant la ligne *Z Z*, fig. 3.
Fig. 5. Coupe verticale de la boîte à vapeur, où l'on voit le robinet distributeur *o* dans la position qu'il occupe au moment où la vapeur arrivant de la chaudière passe par le conduit *M*, sur la tête du piston, tandis que la vapeur qui était sous le piston passe par le conduit *N*, traverse le robinet *O*, et s'échappe à l'extérieur par le conduit *Q* enveloppé par un tuyau *V*. Voy. fig. 6.
Fig. 6. Coupe de la même boîte à vapeur. Le robinet *O* y est représenté au moment où la vapeur de la chaudière passe par le conduit *N*, sous le piston, pendant que celle qui est sur la tête s'échappe au dehors.

A, chaudière en fonte. Voy. fig. 1 et 3.

B, cylindre à vapeur plongé dans la chaudière comme on le voit en *B'*, fig. 3.

C, tige du piston, attachée à la traverse en fonte *D*.

E, bielles transmettant, d'un côté, le mouvement à la roue dentée *F*, et de l'autre au volant *G*.

H, guides de la traverse *D*.

K, boîtes pratiquées dans la traverse *D* pour recevoir à frottement les guides *H*.

I, support boulonné sur la bride de la chaudière.

J, levier auquel est attachée la tige *S* de la pompe alimentaire *R*, destinée à porter l'eau dans la chaudière. Une de ses extrémités est

reçue dans une fourchette faisant partie de la traverse *D*, et l'autre est fixée à charnière à la partie supérieure du support *I*.

L, régulateur manœuvrant le robinet *O*.

P, foyer placé dans la chaudière. Voy. fig. 4.

U, conduit de la fumée dans la cheminée *T*, fig. 3.

PLANCHE XXVI.

Machine à haute pression et à simple effet.

Fig. 1re. Vue en élévation et de face de la machine, et coupe du fourneau, de la chaudière et du cylindre qui est placé dans la chaudière même. Cette figure la représente au moment où le piston, pressé par la vapeur, est arrivé au milieu de sa course.

Fig. 2. Plan du dessus de la chaudière où l'on voit la coupe horizontale du cylindre, suivant la ligne xx, fig. 1re.

Fig. 3. Vue de profil de la machine, et coupe verticale de la chaudière, des bouilleurs et de la boîte à vapeur. Le piston est parvenu ici à son point le plus élevé.

Fig. 4. Autre coupe de la boîte à vapeur vue isolément et faite sur une échelle double.

Fig. 5. Coupe verticale de la même boîte à vapeur dans une direction parallèle à l'axe du robinet distributeur.

Fig. 6. Coupe transversale du robinet distributeur vis-à-vis le canal d'admission de la vapeur.

Fig. 7. Coupe horizontale de l'excentrique qui fait jouer le robinet distributeur.

Fig. 8. Vue de face des deux arcs de roues dentées qu'on voit de profil, fig. 5, qui donne le mouvement alternatif de rotation au robinet distributeur.

A, chaudière en fonte pleine d'eau jusqu'à la ligne ZZ; c'est un cylindre vertical, dont le bas est terminé par une portion sphérique, et le haut fermé par une plaque circulaire fixée avec des boulons contre les rebords de la chaudière.

B, cylindres bouilleurs également en fonte. Ils sont fixés contre la portion sphérique de la chaudière dans une position horizontale, immédiatement au-dessus du foyer.

C, cylindre de la machine ouvert par le haut, et maintenu en place et dans une position verticale par la plaque circulaire qui recouvre la chaudière.

D, piston garni en tresse de chanvre sur une portion ; il est métallique sur l'autre. On voit, fig. 1re, que le bout inférieur de la bielle *E*, qui transmet le mouvement à l'axe du volant *F*, est articulé au centre du piston, qui, à cet effet, est creux par le haut.

Le volant *F* porte à sa circonférence une masse *G* placée dans la direction de la manivelle *H*; on en verra l'utilité dans l'explication du mouvement de la machine.

I, robinet d'admission de la vapeur, placé au tuyau qui met en communication la chaudière et la boîte à vapeur.

J, robinet distributeur placé dans la boîte à vapeur qui, par sa position, fig. 4, met la chaudière *A* en communication avec le bas du cylindre *C*, où la vapeur arrive par le canal *a*; ce robinet fait communiquer au moyen du tuyau *c*, cette même partie du cylindre avec la bâche *K*, où la vapeur se rend après avoir produit son effet.

L, axe vertical que les roues d'engrenage conique *e d* font tourner sur lui-même, et qui va à son tour donner le mouvement de rotation alternatif au robinet distributeur *J*, au moyen de l'excentrique *M*, fig. 7, et du mécanisme représenté de profil et de face dans les fig. 5 et 8. A cet effet, la lunette *N*, fig. 7, que l'excentrique pousse alternativement dans le sens des guides *f*, porte une queue *g* dont le prolongement va passer dans le trou allongé *h*, de la pièce fig. 8; d'où il résulte un mouvement d'oscillation qui se communique, à l'aide des arcs de roues dentées *m n*, au robinet distributeur, sur l'axe duquel est montée la portion de roue *n*.

On remarquera que l'excentrique *M* porte une partie saillante destinée à fermer le robinet distributeur *J*, avant que le piston *D* ait achevé sa course.

Q, pompe foulante qui alimente la chaudière d'eau chaude provenant de la bâche *K*. Le jeu de cette pompe est produit par un excentrique *R* placé sur l'axe du volant, et par un levier angulaire *S* qui en détermine la direction.

T, grande poulie à courroie montée sur l'axe du volant, qui transmet le mouvement aux machines de la fabrique.

D'après cette explication, le jeu ou mouvement de la machine est facile à comprendre.

Le robinet d'admission *I* étant maintenu constamment ouvert d'une manière convenable par un régulateur, et le robinet distributeur ayant la position qu'on lui voit fig. 4, la vapeur arrive avec toute sa force expansive dans le bas du cylindre, et force le piston à monter jusqu'au haut de sa course. Alors, le robinet distributeur prend la position qu'on voit fig. 3, et la vapeur s'échappant par le canal *b*, *c*, va se contracter dans la bâche *K*, et laisse redescendre le piston. Il y est sollicité non-seulement par le mouvement acquis du volant, mais encore par son propre poids, ceux de la bielle et de la masse *G* que porte la circonférence du volant, qui dans cet instant ont dépassé la verticale.

PLANCHE XXVII.

Machine à vapeur de M. Edwards, d'après le système de Woolf.

Fig. 1. Coupe verticale suivant la ligne *rr*, fig. 2, des deux cylindres *A* et *B*, dans leur enveloppe commune *C*.

D, tuyau par lequel la vapeur venant de la chaudière est admise dans l'enveloppe *C*.

E, piston métallique du petit cylindre *A*, prêt à arriver au plus bas de sa course.

F, piston également métallique du grand cylindre *B*, parvenu au même point de sa course que le précédent.

G, boîtes à étoupes dans lesquelles passent et glissent à frottement doux les tiges des pistons.

Fig. 2. Coupe horizontale des deux cylindres, suivant la ligne brisée *s s* fig. 1. On voit en *a* et *b* deux ouvertures ménagées dans l'épaisseur de la fonte sur les côtés des cylindres, par où la vapeur arrive dans l'intérieur de ceux-ci, tantôt en dessus et tantôt en dessous des pistons, suivant que le robinet distributeur livre ou ferme le passage, comme on le verra plus loin.

Fig. 3. Coupe verticale du petit cylindre suivant la ligne *t t*, fig. 4, avec sa boîte à vapeur *H*.

c, canal qui conduit la vapeur de la boîte dans le haut du petit cylindre *A*.

e, canal qui met en communication la boîte à vapeur avec le bas du même cylindre.

Fig. 4. Coupe horizontale des deux cylindres également dans leur enveloppe commune, avec la boîte à vapeur suivant la ligne *u u*, fig. 3.

f, robinet d'admission de la vapeur dans la boîte. On voit que la vapeur entrant par le côté du robinet, sort par le petit bout qui la

dirige vers le robinet distributeur *g*. La coupe en est représentée figure 8.

Fig. 5. Coupe verticale de la boite à vapeur suivant la ligne *V V*; fig. 6, avec l'appareil du mécanisme destiné à faire jouer les soupapes coniques enfilées *h*, qui ferment et ouvrent alternativement par le haut et par le bas le canal *i* qui mène la vapeur dans le condenseur.

j, canal qui conduit la vapeur à la partie supérieure du grand cylindre *B*. On voit que dans ce moment la soupape conique supérieure *h* ferme le canal *i*, et cela pendant tout le temps que le piston descend.

k, canal qui communique avec le bas du grand cylindre. Dans ce moment, la soupape conique *h* inférieure est ouverte, et la vapeur qui occupait le dessous du piston se rend dans le condenseur en suivant le canal *i*.

l, boites à étoupe dans lesquelles passent les tiges enfilées des soupapes *h*.

K, ressorts à boudin qui réagissant sur les tiges des soupapes, en tiennent toujours une fermée pendant que l'autre est ouverte.

Fig. 6. Coupe horizontale de la boite, suivant la ligne *X X*, fig 5.

Fig. 7. Autre coupe horizontale de la mêmeboite, suivant la ligne *Y Y* fig. 5.

Fig. 8. Coupe verticale de ladite boite, suivant la ligne *Z Z*, fig. 5.

l, conduits pratiqués dans l'épaisseur de la boite à vapeur, pour mettre en communication les deux ouvertures du robinet distributeur *g*.

Les coupes des deux ouvertures de ce robinet sont représentées par les figures *M*, *N*, dont une, celle qui dirige la vapeur venant du robinet d'admission *f*, dans le petit cylindre, est en quart de cercle; et l'autre, celle qui dirige la vapeur venant du petit cylindre dans le grand, est directe.

Fig. 9. Vue de face des deux cylindres, dans leurs enveloppes et du mécanisme qui fait jouer les soupapes et le robinet distributeur.

L'excentrique *m*, recevant son mouvement de l'axe du volant de la machine, fait, en tournant autour du point *n*, monter et descendre le système des tiges *o*, *p*, dont la première fait manœuvrer les soupapes enfilées *h*, et la seconde le robinet distributeur *g*, à l'aide de la crémaillère *q*. Les robinets d'admission et de distribution *f* et *g* sont maintenus dans leur position, par des brides à charnière et à vis de pression *r*; la tête du premier de ces robinets porte un bras de levier *s* au moyen duquel le régulateur le fait agir. Voy. fig. 10.

Fig. 10. Projection horizontale du dessus de la figure précédente.

Fig. 11. Vue verticale et de côté du mécanisme qui fait jouer les soupapes enfilées *h*.

La vapeur venant de la chaudière, et remplissant, comme nous l'avons dit, l'espace qui se trouve entre les cylindres et leur enveloppe, est admise dans la boite à vapeur *H* par le canal *c* (fig. 3 et 4); le robinet *f* la conduit vis-à-vis l'ouverture en quart de cercle du robinet distributeur *g*, qui, à son tour, par un mouvement de rotation alternatif sur lui-même, donné par la crémaillère *q* (fig. 9), la dirige tantôt en dessus et tantôt en dessous du petit piston *E*. Mais pendant que la vapeur arrive d'un côté dans le petit cylindre, celle qui était de l'autre gagnant le conduit *l*, qu'on voit (fig. 8), ainsi que la deuxième ouverture du robinet distributeur qui, dans ce moment, se trouve convenablement dirigée, se rend dans le grand cylindre, où elle agit sur le piston dans le même sens que dans le petit; c'est-à-dire que la vapeur qui remplissait le dessous du petit cylindre vient remplir le dessus du grand, et *vice versâ*. (Voy. fig. 5.) Pendant ce temps-là, la vapeur qui occupait la portion du grand cylindre, du côté où le piston se meut, trouvant la soupape conique *h'* ouverte, se précipite vers le condenseur par le canal *i*.

PLANCHE XXVIII.

Machine à vapeur d'après le système de Woolf et à trois cylindres par MM. Aitken et Steel, avec un fourneau fumivore à foyer tournant.

Fig. 1. Vue en élévation d'une des faces extérieures de la machine, et coupe verticale du fourneau fumivore à fôyer tournant, avec deux bouilleurs et sa chaudière en fonte.

Fig. 2. Coupe verticale des trois cylindres *A*, *B* et *C* de la machine, rapportés dans un même plan, pour en mieux faire comprendre la disposition. Nous désignerons par les mêmes lettres les pistons de ces mêmes cylindres, qui sont dans cette figure au point le plus élevé de leur course.

Fig. 3. Coupe verticale dans laquelle on suppose les pistons arrivés au plus bas de leur course. On voit dans cette figure que les tiges des pistons sont unies invariablement à une traverse horizontale *D* qui, montant et descendant parallèlement à elle-même entre des guides placés vis-à-vis les galets *E*, donnent le mouvement au volant par le moyen des bielles appliquées aux points *F*.

Fig. 4. Plan représentant la position des cylindres dans leur enveloppe commune.

Fig. 5 et 6. Coupes des boites à vapeur représentant ensemble un des temps de la machine, celui où les pistons sont en haut.

Fig. 7. Les soupapes enfilées *a*, *b*, *c*, et *d*, sont placées dans un ordre inverse lorsque les pistons sont en bas.

Cela posé, revenons à l'explication du jeu de la machine. *a, b, c, d*, fig. 2 et 3, soupapes enfilées qui distribuent, suivant leur position, la vapeur dans le bas ou le haut des cylindres *A*, *B*, *C*, ou qui lui font prendre le canal *i* qui la conduit au condenseur. *e*, canal d'admission de la vapeur dans la boite. *f*, canal qui met en communication le bas du cylindre *A*, soit avec la boite à vapeur, soit avec le haut des cylindres *A* et *B*. *g* passage de la vapeur de la boite dans le haut du

cylindre *A*, et réciproquement, de cette partie du cylindre dans le conduit qui mène au condenseur *i*.

h, communication de la boîte à vapeur avec le haut du cylindre *B*.

i, canal par où la vapeur se rend au condenseur.

k, communication de la boîte à vapeur avec le haut du cylindre *C*.

l, canal qui met en communication la boîte à vapeur avec le bas des cylindres *B* et *C*.

Supposons le cas de la fig. 2, où les pistons se trouvent dans le haut de leur course; la soupape *a* est en bas, et la soupape *b* est en haut. La première ferme le tuyau *e* d'admission de la vapeur, et la seconde le conduit *i* au condenseur. Le canal *f* et les passages *g*, *h*, étant ouverts, la vapeur qui occupe le bas du cylindre *A* se rend, d'un côté, dans le haut de ce même cylindre, et de l'autre dans le haut du grand cylindre *B*. Mais, pendant ce temps, les soupapes enfilées *c*, *d*, ont une position inverse, c'est-à-dire que le tuyau *e* d'admission de la vapeur et le canal *i* qui conduit au condenseur sont ouverts; alors la vapeur arrive directement de la chaudière dans le haut du petit cylindre *C*, tandis que la vapeur qui occupe le bas du cylindre, ainsi que le bas du grand cylindre *B*, se rend, en suivant le canal *l* et le canal *i*, dans le condenseur, et forme ainsi le vide au-devant des pistons *C* et *B*. La descente des trois pistons *A*, *B*, *C*, est déterminée simultanément, savoir, suivant les auteurs de cette machine : pour le premier, avec une force motrice nulle, puisque le bas et le haut se trouvant en communication, le piston est également pressé dans les deux sens; pour le second, avec une force qui est en raison inverse des capacités que la vapeur ira occuper en sortant du cylindre *A*, capacités qui se composent du cylindre *A* et du cylindre *B*, qui est dans le rapport de 1 à 4, ce qui donne 5 pour l'espace occupé en second lieu par la vapeur. En admettant que la pression de la vapeur dans le petit cylindre *A* fût de 40 *livres* par *pouce* carré, elle ne sera donc plus que de $\frac{1}{5}$ ou 8 *livres* pour la même étendue de surface, dans le grand cylindre. Son piston descendra avec une force motrice représentée par 32 *livres* de pression par *pouce* carré, sans être diminué par aucun autre obstacle que par le frottement. Le troisième piston descend avec toute la force expansive de la vapeur venant de

la chaudière, c'est-à-dire avec une force de 40 *livres* par *pouce* carré. La somme des forces motrices qui font descendre les pistons est donc de 72 *livres* par *pouce* carré.

Cette force, suivant les mêmes auteurs, ne serait, dans le système de Woolf, que de 70 *livres* par *pouce* carré.

Les trois pistons arrivés au plus bas de leur course, comme on le voit fig. 3, remontent avec une force motrice égale à celle qui les a fait descendre. A son tour la vapeur contenue dans le cylindre *C* passe dans le bas de ce même cylindre et dans le bas du grand cylindre *B*, en se dirigeant par les passages *k*, *l*, que les soupapes enfilées *c*, *d*, laissent libres, tandis que la vapeur qui occupe le haut des cylindres *B* et *A* se rend au condenseur par les passages *h* et *g*, *i*; et la vapeur de la chaudière introduite par le canal *e* vient remplir le bas du cylindre *A*. Ainsi de suite, en faisant alternativement le vide devant l'un des petits pistons; tandis que la même vapeur, dans l'autre, se trouve en même temps devant et derrière, et par conséquent en équilibre, ne se mouvant que parce que sa tige est unie au système général des deux autres pistons.

Nous revenons actuellement au fourneau fumivore à foyer tournant : nous en avons vu une coupe verticale dans la fig. 1.

G sont les bouilleurs en fonte qui s'unissent à la chaudière *H*.

Fig. 7. Plan de la grille tournante.

Fig. 8. Coupe verticale du fourneau, mais avec une chaudière ordinaire.

I, cône métallique denté en hélice comme la noix d'un moulin. Ce cône en tournant sur son axe, par le moyen de rouages, fait tomber sur la grille tournante *K* le charbon contenu dans la trémie *L*, et alimente ainsi le fourneau très-régulièrement, sans qu'on ait besoin de s'en occuper autrement que pour entretenir du charbon dans la trémie L.

Ce fourneau est regardé comme étant fumivore, parce que le charbon tombant sur le devant de la grille tournante, la grande quantité de fumée qu'il produit d'abord se trouve brûlée pendant son trajet à travers toute la largeur du foyer, qui, d'ailleurs, tourne lentement.

PLANCHE XXIX.

Machine rotative à vapeur de M. Masterman.

Fig. 1. Coupe verticale.

Fig. 2. Coupe verticale passant par l'axe de la machine et perpendiculairement à la coupe précédente.

Pour faire tourner la roue qui fait le corps même de la machine, on remplit d'eau chaude ou froide la moitié de l'anneau creux *a a*, par l'intermédiaire du réservoir d'eau *b*; l'eau occupe ainsi la moitié inférieure de la circonférence de cette roue. On met alors l'intérieur de l'anneau en communication avec la chaudière à vapeur; la vapeur passe par le rayon creux *d*, en chassant l'eau devant elle; arrivée dans la partie *e* de l'anneau, elle ferme la soupape *f*, et presse sur l'eau qu'elle fait monter dans la portion opposée de la circonférence *h*; le poids de l'eau entraîne la roue et la soupape *f*, se porte au point *i*, où la vapeur qui la fermait trouve un passage par le rayon creux *k*, pour se dissiper et aller à la condensation par une ouverture que le mouvement de la roue lui ouvre à son centre. Pendant ce temps, une nouvelle quantité de vapeur est arrivée dans l'anneau par un autre rayon horizontal, et a fermé la soupape qui lui correspond et reproduit la manœuvre précédente; cette suite d'actions de la vapeur arrêtée dans son mouvement par la soupape, un peu au-dessus de chaque rayon parvenu à une direction horizontale et repoussant le centre de gravité de l'eau dans la tangente verticale de la roue, détermine et entretient le mouvement de rotation de la machine.

Les contre-poids *n* sont destinés à faire ouvrir les soupapes lorsqu'elles n'éprouvent plus aucune pression de la part de la vapeur, ce qui arrive chaque fois qu'une soupape est sortie de la position qu'elle a en *f* par le mouvement de la roue.

Machine à vapeur à cylindres oscillans sans balancier, de M. Manby.

Fig. 3. Élévation et coupe verticale.

Fig. 4. Vue du côté opposé au volant, avec la coupe de l'un des cylindres, pour marquer l'une de leurs positions.

A, cylindre à vapeur porté par le milieu sur deux tourillons; en *B*, sur l'un de ces tourillons est un renflement dans lequel se trouvent les orifices qui mettent l'intérieur de chaque cylindre en communication avec la chaudière, par le tuyau *C*, armé d'un robinet *D* comme dans les autres machines.

Les tiges *E* des pistons, dont l'une est supposée enlevée dans la fig. 3, y sont attachées chacune à un coude de l'axe qui porte le volant *G*.

On conçoit que tous les écarts, par rapport à une ligne droite verticale, que les coudes font éprouver aux tiges des pistons, en tournant avec le volant, sont suivis par les corps de pompe, puisqu'ils peuvent osciller sur leurs tourillons; et il résulte de cette disposition que sans balancier les tiges des pistons se meuvent toujours parallèlement aux parois intérieures des cylindres; elles se prêtent, sans se forcer, à toutes les positions que les coudes leur font prendre.

H, pompe à air. *I*, tuyaux de communication avec les cylindres; on voit en *K*, derrière la pompe à air, le condenseur avec lequel il est lié.

Machine à vapeur sans balancier proprement dit.

Fig. 5. Élévation de cette machine.

a, leviers articulés chacun à un point fixe *b* et à la pièce mobile *c*.

La tige *d* du piston est brisée en *e* et se lie à la manivelle du volant *g* par une petite bielle *f*.

Par la disposition des leviers *a*, de la pièce *c* et de la petite bielle *f*, la tige rigide *d* du piston ne sort pas sensiblement de la verticale dans la conversion du mouvement rectiligne de va-et-vient en rotation continue.

h, pompe à air. On voit en *i* sur la tige du piston de cette pompe,

deux points d'arrêt destinés à faire ouvrir et fermer le régulateur *k* par la queue *l*.

m, tuyau qui conduit la vapeur au condenseur.

n, pompe alimentaire puisant le trop plein de l'eau chaude de la bâche *p*.

r, pompe à eau froide.

Système de la machine à vapeur d'Olivier Évans.

Fig. 6. *A*, corps de pompe.

B, cylindre renfermant un serpentin dans lequel la vapeur passe par le tuyau *C* pour se condenser.

b, tuyau de décharge.

D, pompe à eau froide pour rafraichir, par le tuyau de communication *d*, la capacité qui renferme le serpentin.

F, pompe alimentaire. On voit pour cette pompe, comme pour la précédente, comment le mouvement leur est communiqué par le balancier.

G, balancier ; il diffère des autres en ce que son extrémité *I*, attachée à la tige du piston, n'entraine pas dans son mouvement cette tige hors de la verticale, attendu que le balancier cède sur son support à articulation *L* par l'effet de la tringle *o* arrêtée au point fixe *P*.

M, bielle qu'on voit unie à la manivelle du volant *N*.

ÉCLAIRCISSEMENS

ET

DÉVELOPPEMENS.

ÉCLAIRCISSEMENS

ET

DÉVELOPPEMENS.

THERMOMÈTRE.

Les changemens de volume que subissent les liquides, suivant que la quantité de calorique augmente ou diminue dans l'intérieur de ces corps, ont donné naissance à un instrument précieux pour le physicien, qu'il dirige dans une multitude d'expériences, et qui est même devenu d'un usage presque général, par l'intérêt qu'ont tous les hommes à le consulter. Cet instrument est le thermomètre, qui sert à mesurer les degrés de la chaleur. Avant son invention, on n'avait que des indications incertaines et confuses sur les variations de la température; on se bornait à comparer entre eux les hivers les plus rigoureux et les étés les plus brûlans, d'après certains effets généraux qui offraient un rapprochement presque aussi vague que le sont par elles-mêmes les expressions de froid et de chaud. Le thermomètre nous a mis à portée de tenir un journal fidèle et détaillé des différentes saisons de chaque année, et des effets gradués de leur température.

Cet instrument, dont on attribue la première idée à un Hollandais nommé Drebbel, était d'abord très-imparfait, comme le sont la plupart des inventions humaines à leur naissance. Il consistait en un tube de verre, terminé d'un côté par une boule, et ouvert à l'extrémité opposée. On le plongeait, par cette même extrémité, dans une liqueur colorée, puis, en appliquant la main sur la boule, pour échauffer et dilater l'air intérieur, on déterminait une portion de cet air à s'échapper à travers la liqueur; en sorte que, quand on retirait ensuite la main, l'air qui restait, venant à se condenser par le refroidissement, permettait à la liqueur de s'introduire jusqu'à une cer-

taine hauteur par la pression de l'air extérieur. L'instrument se trouvait alors en état de servir, et c'était la dilatation de l'air intérieur, ou sa contraction, en vertu des variations de la température, qui en faisant descendre la liqueur suspendue dans le tube, ou en la laissant remonter, indiquait les mêmes variations. Mais il est aisé de sentir que cet instrument, dont la marche était compliquée à la fois des effets du thermomètre et de ceux du baromètre, ne pouvait donner que des indications équivoques.

Bientôt les physiciens s'occupèrent de perfectionner cette première ébauche, et d'amener l'instrument à n'être plus qu'un simple thermomètre. Tel était celui qu'on a nommé *thermomètre de Florence*, et qui consiste dans un tube de verre terminé de même par une boule, mais que l'on soudait hermétiquement par le haut, après l'avoir rempli d'une liqueur colorée jusque vers le milieu de sa hauteur.

On appliquait ensuite ce tube sur une planche graduée, et l'on jugeait de la dilatation et de la contraction de la liqueur par le nombre des degrés parcourus. Mais comme tout était arbitraire, et dans la construction de l'instrument, et dans les divisions de l'échelle, chaque instrument avait un langage qui ne pouvait être entendu que par celui qui le consultait; et deux instrumens ainsi construits ne pouvaient se servir mutuellement d'interprètes, ni mettre les observateurs à portée de juger si la chaleur avait été plus forte, ou le froid plus vif dans un lieu que dans un autre.

La perfection du thermomètre réside essentiellement dans la réunion de deux qualités, dont l'une est d'être comparable avec lui-même, dans les divers mouvemens de sa liqueur, et l'autre d'être comparable avec tous les thermomètres construits d'après les mêmes principes, situés dans des climats différens. Pour concevoir en quoi consiste la première qualité, il faut se rappeler que le calorique communiqué à un corps emploie une partie de ses molécules à élever la température de ce corps, et l'autre à le dilater. L'élévation de température dépend de la quantité dont la tension du calorique sensible a été augmentée. Or, on juge de cet acroissement de tension par la quantité de la dilatation, qui est l'effet d'une autre partie du calorique, c'est-à-dire de celle qui est devenue latente. Il faut donc, pour que la quantité de la

dilatation puisse donner la mesure de l'accroissement de tension, que la partie du calorique qui sert à dilater le corps soit proportionnelle à celle qui élève la température. C'est ce qui n'a pas lieu dans la plupart des corps, où le rapport, entre la portion de calorique qui dilate et celle qui échauffe, varie avec la dilatation elle-même.....

Pour obtenir la seconde qualité, qui rend les divers thermomètres comparables entre eux, il faut que les mouvemens de la liqueur se combinent tellement avec la graduation, dans chacun d'eux, que quand la température est la même, dans les différens lieux, où nous les supposons placés, ils indiquent tous le même degré de leur échelle. C'est vers ce but que se sont dirigées d'abord les recherches des physiciens ; celles qui ont rapport à la première qualité, dont l'influence était alors méconnue ou négligée, tenaient à des procédés délicats, réservés pour le temps où la théorie du calorique, si délicate elle-même dans son ensemble, serait arrivée plus près de la perfection. Avant de faire connaître la construction qui réunit l'une et l'autre qualité, nous en décrirons une qui répond à une époque mémorable dans l'histoire du thermomètre, et qui mérite d'être exposée, même après que l'on a trouvé encore mieux.

Thermomètre de Réaumur.

Ce célèbre physicien, en imaginant son thermomètre, s'était proposé de remplir trois conditions : l'une, que la graduation partit d'un terme constant où il plaçait le zéro du thermomètre; la seconde, que les degrés eussent un rapport déterminé avec la capacité tant de la boule que de la partie du tube située entre cette boule et le point de zéro; la troisième, que l'alcohol qu'il employait eût un degré connu de dilatabilité auquel on pût toujours l'amener. Il y avait à choisir entre deux termes constans, qui dès lors avaient été remarqués, savoir : la chaleur de l'eau bouillante, et le froid produit par la congélation de l'eau. Il se décida en faveur du dernier, comme étant celui qui semblait donner la limite naturelle entre le chaud et le froid, et il choisit, pour le déterminer, l'instant de la congélation artificielle de l'eau à l'aide d'un mélange de glace et de sel marin. On a substitué

depuis à ce terme celui de la glace fondante, qui est pour le moins aussi fixe.

Réaumur se servait d'eau commune pour graduer son thermomètre. Il remplissait d'abord de cette eau la boule et une partie du tube, et s'arrangeait de manière que la quantité employée fût mille fois aussi grande que celle qui pouvait être contenue dans une très-petite mesure prise pour unité. Ayant marqué zéro à l'endroit où l'eau s'était arrêtée, il se disposait à tracer les degrés en commençant par ceux de condensation. Dans cette vue, il faisait d'abord sortir du tube une telle quantité d'eau, qu'elle pût remplir exactement une mesure qui contenait un certain nombre de fois l'unité; supposons que cette mesure fût de 25 unités, il devait y avoir, dans ce cas, 25 degrés de condensation sur le thermomètre. Il se servait de la mesure élémentaire, pour obtenir ces degrés, en sorte que chaque élévation de l'eau dans l'intérieur du tube, produite par le versement d'une mesure élémentaire, déterminait la grandeur d'un degré. Dans cette seconde opération, Réaumur substituait le mercure à l'eau, parce qu'il ne s'attache point au verre, et qu'il en résulte une plus grande précision. Le mercure, en tombant au fond de la boule, faisait monter d'autant le liquide contenu dans le tube. A l'aide du même procédé, Réaumur poussait la graduation jusqu'à 80 degrés au-dessus de zéro. Il préférait de graduer ainsi le tube, en y faisant entrer successivement des quantités égales de liquide, plutôt que de continuer la division d'après la grandeur connue d'un seul degré, pour n'avoir rien à craindre des inégalités intérieures du tube et des variations de son diamètre.

La graduation une fois établie, Réaumur vidait le tube, et y versait de l'alcohol jusqu'à la hauteur de quatre ou cinq degrés au-dessus de zéro; puis il plongeait la boule dans l'eau que contenait un vase de fer-blanc qu'il entourait de glace artificielle. Au moment où l'eau entrait en congélation, Réaumur observait le point où s'arrêtait l'alcohol; et suivant que ce liquide se trouvait un peu au-dessus ou au-dessous de zéro, il en faisait sortir ou en ajoutait, jusqu'à ce que sa hauteur dans le tube coïncidât exactement avec le point de zéro.

On voit par ces détails que pour un degré de chaleur, l'alcohol se

dilatait d'une quantité égale à la millième partie de celle qui, au moment de la congélation, remplissait la boule et la partie du tube comprise entre cette boule et le point de zéro.

L'opération se serait bornée aux procédés que nous venons de décrire, si tous les alcohols avaient la même quantité et la même dilatabilité. Mais, comme on ne devait pas s'attendre à ces avantages, il avait fallu fixer la qualité de dilatation dont l'alcohol, employé dans la construction du thermomètre devait être susceptible. Voici comment Réaumur avait été conduit à cette détermination. Ayant plongé à plusieurs reprises un tube rempli d'alcohol jusqu'à une certaine hauteur dans de l'eau qui s'échauffait toujours de plus en plus, et finissait par bouillir, il avait remarqué que quand les bouillonnemens que la chaleur avait excités dans l'alcohol lui-même s'étaient apaisés, après que le tube avait été retiré de l'eau, l'alcohol se trouvait toujours plus haut qu'avant l'immersion; mais cette dilatation n'avait lieu que jusqu'à un certain terme, passé lequel, aussitôt que l'ébullition avait cessé, la liqueur reprenait son niveau. Il avait regardé comme un terme fixe pour chaque espèce d'alcohol cette dilatation, qui était la plus grande que le liquide pût éprouver par la chaleur de l'eau bouillante, lorsque lui-même ne bouillait pas; il résultait de là qu'il y avait, relativement à un alcohol donné, un rapport constant entre le volume du liquide, qui répondait au terme de la congélation, et celui du même liquide dilaté le plus qu'il était possible sans bouillir. Ce rapport était plus grand pour l'alcohol rectifié, et diminuait lorsqu'on avait affaibli par un mélange d'eau. Or, Réaumur s'en était tenu au rapport de 1000 à 1080, qui ne pouvait convenir qu'à un alcohol un peu étendu d'eau, et il fallait chercher par tâtonnement le degré de mélange qui donnait ce rapport.

On voit par-là que Réaumur n'avait employé que secondairement la chaleur de l'eau bouillante, et le degré de 80 sur son thermomètre était nécessairement situé plus bas que sur le thermomètre ordinaire, puisqu'il faut une chaleur moindre que celle de l'eau bouillante pour amener l'alcohol au degré où il est sur le point de bouillir.

La construction dont nous venons de parler fut généralement accueillie. On ne parla presque plus que du thermomètre de Réaumur; et

il se forma une liaison si intime entre le nom de l'inventeur et celui de l'instrument, qu'aujourd'hui même encore les thermomètres dont nous nous servons sont appelés *thermomètres de Réaumur*, quoiqu'ils ne soient pas faits d'après sa méthode.

Thermomètre moderne usité en France.

La marche de ce nouvel instrument se rapporte à deux termes fixes, dont l'un, qui sert de point de départ, ne diffère de celui qu'employait Réaumur que par la circonstance dans laquelle se trouve l'eau dont la température détermine ce même terme, et qui est à l'état de glace fondante, et non à l'état de congélation commencée; l'autre, qui donne la limite opposée, est la chaleur de l'eau bouillante. On choisit le tube le mieux calibré qu'il est possible, et on divise d'abord en quatre-vingts degrés la distance comprise entre les deux termes fixes; puis on continue la même division au-dessous de zéro. Dans le thermomètre que l'on appelle *centigrade*, la distance dont nous venons de parler est divisée en cent parties.

Cette méthode réunit au mérite d'une plus grande exactitude celui de la simplicité, en ce qu'elle ramène uniquement la construction du thermomètre à la cause même des variations de cet instrument, et aux deux époques où l'eau, prenant tout à coup une nouvelle forme, avertit le physicien de l'existence du point fixe qu'il cherche à saisir. Nous devons faire observer, à ce sujet, que la pression de l'air n'influe pas sensiblement sur la première limite, qui est le degré de la glace fondante, au lieu qu'il est nécessaire d'avoir égard à cette pression pour déterminer la limite opposée; parce qu'à proportion que l'eau est plus ou moins comprimée, elle entre en ébullition par une température plus haute et plus basse. On a choisi la pression qui répond à une hauteur de 28 pouces dans le baromètre, parce que c'est la pression moyenne, ou celle qui a lieu communément aux bords de la mer.

Il est aisé de voir maintenant que les deux limites étant les mêmes dans différens thermomètres construits d'après ces principes, et les degrés de l'échelle, dans tous ces thermomètres, étant des parties proportionnelles à la distance entre les deux limites, les indications

données par les mouvemens de la liqueur, se rapporteront entre elles, quelle que soit d'ailleurs la distance dont il s'agit. La graduation deviendra ainsi comme une langue de communication entre tous les thermomètres; en sorte que si deux de ces instrumens placés, l'un à Paris, l'autre à Amsterdam, indiquent le même degré, on sera sûr que la température est la même dans les deux endroits, et que s'ils marquent différens degrés, chacun d'eux parlera précisément comme aurait fait l'autre dans la même position.

On s'est servi pendant long-temps d'alcohol, ainsi que l'avait fait Réaumur, pour avoir une colonne de liquide dont les élévations et les abaissemens indiquassent les diversités de la température. Nous avons décrit le procédé à l'aide duquel le même physicien s'était efforcé de remédier à l'inconvénient qu'a cette substance de varier dans sa pureté et dans sa densité, suivant les différens procédés que l'on emploie pour l'obtenir. Mais on ne pouvait pas assez compter sur l'exactitude de ce procédé, d'ailleurs incommode par les tâtonnemens qu'il exigeait. Ainsi les thermomètres, à cet égard, laissaient de l'incertitude sur l'accord qui devait régner entre eux. Mais l'alcohol a un autre inconvénient qui avait échappé aux observateurs; il consiste en ce que la marche du thermomètre construit avec ce liquide n'est pas conforme à celle de la température, en sorte que les dilatations progressives de ce même liquide marquent des degrés sensiblement inégaux, pendant des variations égales de température; et ici revient la première des conditions dont nous avons parlé, et sans laquelle chaque thermomètre cesse d'être comparable avec lui-même. Il nous reste à faire voir que le mercure remplace avantageusement l'alcohol sous tous les rapports.

Il est d'abord facile de concevoir que ce métal liquide, lorsqu'il a été purifié, est partout homogène et d'une densité uniforme. On a de plus reconnu que sa marche dans le thermomètre offrait des différences sensibles avec celle de l'alcohol, et le célèbre Deluc a fait des expériences qui lui ont paru prouver que ces différences provenaient de ce que l'alcohol subissait des anomalies dont le mercure était à peu près exempt. Dans ces expériences, il mêlait ensemble deux masses égales d'eau, ayant des températures différentes, l'une, par

exemple, de 75 degrés du thermomètre en 80 parties, l'autre de 9 degrés qui était en même temps celle de l'air environnant. La température que devait prendre le mélange était, suivant le même physicien, la moyenne entre les températures des deux masses séparées, c'est-à-dire qu'elle était égale à la demi-somme 40 $\frac{1}{2}$ degrés des températures extrêmes. Or Deluc ayant plongé dans le mélange un thermomètre à mercure qui avait servi à déterminer les températures particulières des deux masses d'eau, remarqua que l'instrument indiquait une température qui ne différait de la moyenne qu'en ce qu'elle était un peu au-dessous.

L'expérience que l'on prenait ici pour juge du thermomètre à mercure péchait par le défaut de précision. Pour le concevoir, remarquons que l'eau chaude, dans ce cas, n'arrive à l'équilibre de température avec l'eau froide, qu'en cédant à celle-ci la moitié du calorique qui détermine la différence de 69 degrés entre les deux températures. Or nous sommes fondés à croire que la partie de cette même moitié qui sert à dilater l'eau froide est plus grande que celle qui, par sa retraite, a occasioné la contraction de l'eau chaude. Il faut donc que réciproquement la partie dont le dégagement donne lieu au refroidissement de l'eau chaude soit plus grande que celle qui est employée à échauffer l'eau froide, puisque la somme des deux parties est égale à la quantité de calorique qui a passé de l'eau chaude dans la froide. Donc la température de la première baisse davantage que celle de la seconde ne s'élève, d'où il suit que la température du mélange doit être au-dessous de la moyenne.

Le célèbre Laplace a trouvé dans le thermomètre à air le véritable terme de comparaison qui devait servir à vérifier la marche du mercure. Supposons qu'une masse d'air reçoive successivement de nouvelles quantités de calorique, et qu'en même temps on la tienne resserrée dans l'espace qu'elle occupait. Il est extrêmement probable que les accroissemens de sa force élastique seront proportionnels aux élévations de sa température, puisque l'une et l'autre dépendent de l'action du calorique. Or si l'air, au lieu d'être coërcé dans le même espace, a la liberté de s'étendre, en restant soumis à une pression constante, ses dilatations seront proportionnelles aux accrois-

semens que recevrait sa force élastique, dans l'hypothèse de l'uniformité de volume; d'où il suit qu'elles seront aussi en rapport avec les élévations de la température, ce qui est le caractère d'un thermomètre toujours d'accord avec lui-même.

Voici maintenant de quelle manière M. Gay-Lussac, sur l'invitation de M. de Laplace, a comparé la marche du thermomètre à mercure avec celle du thermomètre à air. Ayant choisi un tube de verre exactement calibré, terminé en boule d'un côté et ouvert de l'autre, il a introduit dans son intérieur une goutte de mercure, qui s'est trouvée ainsi soumise, d'une part, à la pression de l'air renfermé dans la partie du tube située au-dessous d'elle et dans la boule, et d'une autre part à la pression de l'atmosphère. A mesure que l'air intérieur variait dans sa température, les mouvemens de la goutte de mercure faisaient connaître la quantité dont il s'était dilaté ou contracté.

L'appareil destiné aux expériences était un vase rempli d'eau dans laquelle le tube se trouvait plongé horizontalement, de manière que sa partie située vers l'orifice ouvert était saillante hors du vase, au moyen d'un trou circulaire pratiqué à la paroi latérale. On a d'abord déterminé, relativement à l'air renfermé dans le tube, le terme de la glace fondante et celui de l'eau bouillante, et l'on a fait la même opération sur un thermomètre à mercure. On a divisé ensuite, dans chaque thermomètre, en deux parties égales, l'intervalle entre les deux limites; ce qui a donné de part et d'autre le degré 50 de la division en 100 parties.

Or les deux thermomètres plongés dans le même bain d'eau que l'on avait fait chauffer progressivement indiquèrent à la fois ce degré, avec de légères différences, qui, dans vingt expériences successives, se trouvèrent tantôt en plus et tantôt en moins, et donnèrent une quantité presque nulle pour résultat moyen. On doit en conclure que la marche des deux thermomètres est la même au moins depuis zéro jusqu'au terme de l'eau bouillante, et ainsi le thermomètre à air, dont l'exactitude est comme garantie par la nature même du fluide, mais dont l'exécution paraît d'ailleurs difficile, sert à son tour de garant au thermomètre à mercure; et il est heureux que ce

métal, déjà si remarquable par l'action du calorique, pour le tenir dans un état de liquidité habituelle, le soit doublement, par la régularité avec laquelle cette action s'exerce pour le dilater.

La dilatation apparente indiquée par le thermomètre n'est que la différence d'expansion du liquide et du verre qui le contient, et pour en déduire la dilatation véritable il faudrait connaître la loi suivant laquelle se dilate la matière même de l'enveloppe. Or la mesure de l'expansion des solides est sujette à tant de difficultés, que la plupart des déterminations qui ont été fondées sur elle sont tout-à-fait inexactes. C'est ce qu'ont reconnu MM. Dulong et Petit, en suivant une autre méthode, indépendante de la mesure dont il s'agit. Elle repose uniquement sur la condition d'équilibre des fluides de densités différentes dans les branches d'un siphon renversé. Ils ont trouvé que la dilatation absolue du mercure, entre 0 et 100 degrés est de $\frac{1}{5500}$ pour chaque degré centésimal, tandis que la dilatation apparente n'est que de $\frac{1}{6480}$.

Thermomètre de Fahrenheit et de Delisle.

On trouve fréquemment dans les ouvrages des physiciens étrangers des résultats d'observations relatives à deux ou trois thermomètres, dont il ne sera pas inutile de donner ici une notion, pour mettre chacun à portée de traduire le langage en celui du thermomètre en usage parmi nous.

Le premier est le thermomètre de Fahrenheit, qui est à mercure, et qui a pour termes fixes le degré de la congélation forcée par l'hydrochlorate ammoniacal, et celui qui répond à la chaleur de l'eau bouillante. L'intervalle entre ces deux termes est divisé en 212 parties ; il en résulte que le 32e. degré coïncide avec le zéro de notre thermomètre, ce qui donne 180 degrés depuis ce terme jusqu'à celui de l'eau bouillante. Ainsi, 9 degrés de Fahrenheit valent 4 degrés du thermomètre divisé en 80 parties, et 5 degrés du thermomètre centigrade ; ce qui suffit pour faire le rapprochement entre les résultats donnés par les deux instrumens.

L'autre thermomètre est celui de Delisle, dans lequel ce physicien employait aussi le mercure; il n'avait qu'un seul terme fixe, savoir: celui de la chaleur de l'eau bouillante, où était placé le zéro. Les degrés de condensation au-dessous de ce terme étaient des dix-millièmes de la capacité de la boule et de la partie du tube qui se terminait à zéro; le degré auquel se rapportait la température de la glace fondante, et qui correspond à notre zéro, était le 150e. de l'échelle descendante sur le thermomètre de Delisle; d'où il suit que 15 degrés de ce thermomètre répondent à 8 degrés du thermomètre divisé en 80 parties, et à 10 degrés du thermomètre centigrade; en sorte qu'à l'égard de ce dernier le rapport réduit à la plus grande simplicité est celui de 3 à 2. *Extrait du Traité élémentaire de Physique de Haüy.*

BAROMÈTRE.

Le baromètre, ramené à sa plus grande simplicité, consiste dans un tube de verre de plus de trente *pouces* de hauteur, et scellé par le haut. On remplit ce tube de mercure, que l'on a soin de faire bouillir pour le purger d'air; puis, en tenant le doigt appliqué sur l'orifice inférieur, on renverse le tube, et on le plonge par le même côté, dans une cuvette de verre, où l'on a versé pareillement du mercure. On retire le doigt, et l'on voit à l'instant le mercure descendre dans le tube à la hauteur d'environ 28 *pouces*; on attache ensuite le tube avec sa cuvette sur une planche divisée en *pouces* et en *lignes*, à partir du niveau que donne le mercure renfermé dans la cuvette. On a ainsi un moyen d'observer les variations que subit la pression de l'air, en vertu des causes d'où dépendent les phénomènes de la météorologie.

Cette construction est sujette à une imperfection qui empêche que les mouvemens de la colonne de mercure, estimés d'après les indications de l'échelle, ne soient exactement proportionnels aux différentes pressions de l'air; car, à mesure que cette colonne monte ou descend, elle détermine une petite portion de mercure que renferme la cuvette à passer dans le tube ou à rentrer dans cette cuvette, ce

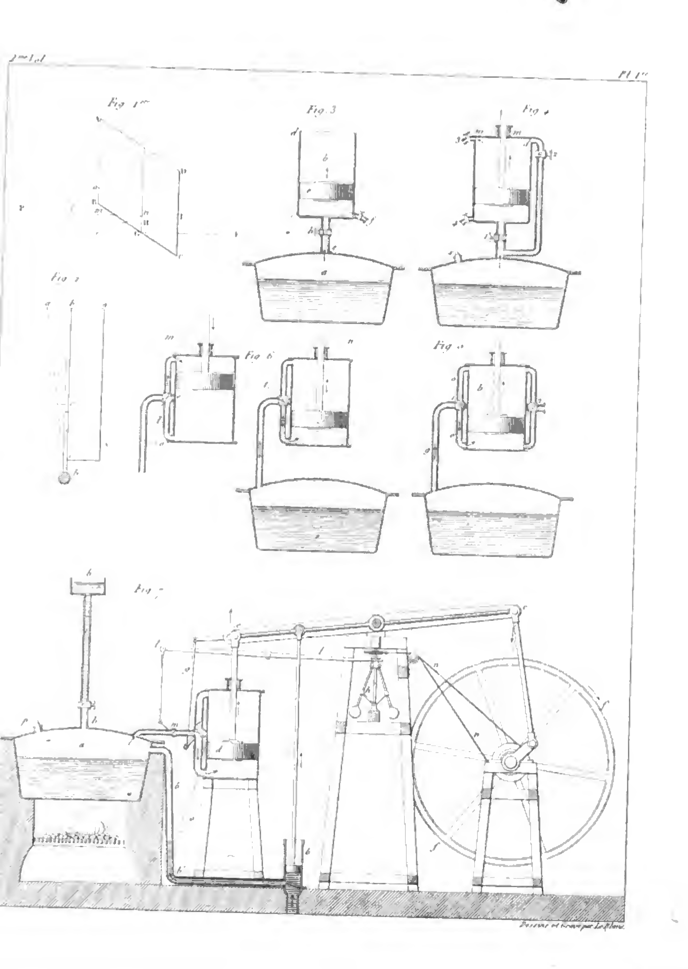
qui fait varier la position du niveau; en sorte qu'il ne répond pas constamment à zéro de l'échelle, qui est cependant le terme de départ auquel se rapporte l'observation de la hauteur à laquelle répond l'extrémité de la colonne sur la même échelle. Cette imperfection est d'autant moins sensible que la cuvette a plus de largeur vers l'endroit de la ligne de niveau. On a imaginé différens moyens pour la faire disparaître : par exemple, dans certains baromètres on a rendu l'échelle mobile dans le sens de sa hauteur; de manière qu'à l'aide d'une vis de rappel on est toujours maître de ramener la ligne de niveau à se trouver exactement vis-à-vis le zéro de l'échelle. On substitue alors à la cuvette une portion du tube même de l'instrument qui, dans ce cas, est recourbé par sa partie inférieure, la variation sensible de niveau qui en résulte pouvant toujours être corrigée par le mouvement de l'échelle. D'autres physiciens emploient une seconde cuvette d'une plus grande capacité, et remplie en partie de mercure, dans laquelle la cuvette du baromètre est entièrement plongée. Lorsqu'on veut faire une observation, on élève le baromètre avec sa cuvette au-dessus du mercure environnant; et comme alors cette cuvette se trouve toujours pleine, la ligne de niveau donnée par la surface supérieure du mercure qu'elle contient conserve une position fixe par rapport à la graduation.

On voit par ce qui précède que l'échelle du baromètre est réglée d'après un tout autre principe que celle du thermomètre. Les mouvemens de la liqueur, dans ce dernier instrument, se mesurent en parties proportionnelles à la distance entre les deux limites données par l'observation; ils diffèrent, dans les divers thermomètres, quoique par des degrés semblables, quand les circonstances sont les mêmes : dans le baromètre, au contraire, où il n'y a qu'un terme fixe, savoir le niveau qui s'établit de lui-même dès le premier instant, la hauteur de la colonne se mesure d'une manière absolue; et elle augmente ou diminue par des degrés égaux, dans les différens baromètres soumis aux mêmes variations de l'atmosphère.

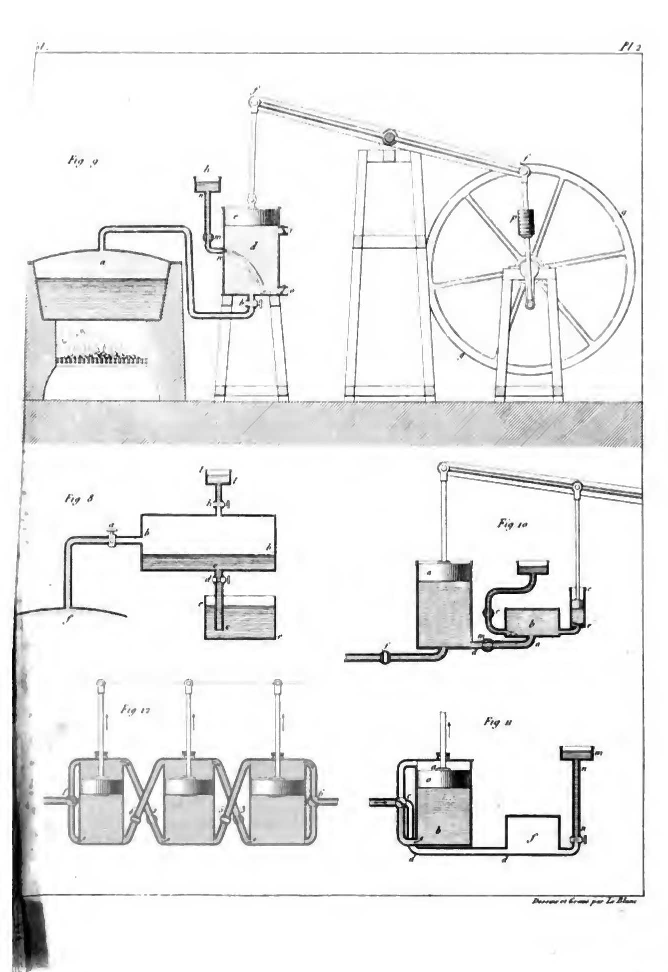
Si l'on veut introduire la division décimale dans l'échelle du baromètre, les limites des variations de la colonne, qui s'étendent dans l'espace compris à peu près entre le vingt-sixième et le vingt-neu-

vième pouce, répondront, l'une à 70, et l'autre à 78 centimètres, depuis la ligne de niveau, ce qui fait 8 centimètres pour le champ de l'observation : dans le même cas, l'élévation de 28 *pouces* répondra à 758 millimètres. *Extrait de l'ouvrage ci-dessus.*

FIN DU SECOND VOLUME.



Dessiné et Gravé par Leblanc


Fig 9
Fig 8
Fig 10
Fig 12
Fig 11
Dessiné et Gravé par Le Blanc



